

**ANALISIS HASIL PENGUKURAN IMPEDANSI LISTRIK
DENGAN MENGGUNAKAN METODE INJEKSI ARUS TIPE
FLOATING DAN HOWLAND**

SKRIPSI

Oleh:

ERLINDA ZULI MAULANDARI

145090801111015



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**



repository.ub.ac.id

**ANALISIS HASIL PENGUKURAN IMPEDANSI LISTRIK
DENGAN MENGGUNAKAN METODE INJEKSI ARUS TIPE
FLOATING DAN HOWLAND**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Sains dalam bidang Fisika

Oleh:

ERLINDA ZULI MAULANDARI

145090801111015



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS HASIL PENGUKURAN IMPEDANSI LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN METODE INJEKSI ARUS TIPE FLOATING DAN HOWLAND

Oleh:

Erlinda Zuli Maulandari

145090801111015

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
Pada tanggal 26 Juni 2018
Dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

Pembimbing II

Pembimbing I

Chomsin S.Widodo, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 19691020.199512.1.002

Dr.Eng. Didik R. Santoso, M.Si
NIP. 19690610.199402.1.001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Prof. Dr.rer.nat. Muhammad Nurhuda
NIP. 196409 199002 1 001



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : ERLINDA ZULI MAULANDARI

NIM : 145090801111015

Jurusan : FISIKA

Penulisan Skripsi berjudul :

**ANALISIS HASIL PENGUKURAN IMPEDANSI LISTRIK
DENGAN MENGGUNAKAN METODE INJEKSI ARUS TIPE
FLOATING DAN HOWLAND**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari Skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya saya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dan Tugas Akhir ini.
2. Apabila di kemudian hari ternyata skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 26 Juni 2018

Yang Menyatakan

(ERLINDA ZULI MAULANDARI)

NIM. 145090801111015



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS HASIL PENGUKURAN IMPEDANSI LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN METODE INJEKSI ARUS TIPE FLOATING DAN HOWLAND

ABSTRAK

Salah satu metode yang sering digunakan untuk mengukur impedansi listrik suatu bahan adalah metode injeksi arus. Metode ini dilakukan dengan menginjeksikan arus bolak-balik (AC) pada bahan uji dan mengukur tegangan yang dihasilkan sebagai fungsi dari impedansi, sesuai dengan Hukum Ohm. Pada penelitian ini dilakukan komparasi dan analisis hasil pengukuran impedansi listrik dengan menggunakan beberapa tipe sumber arus, yaitu tipe *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi pada penelitian ini. Pengukuran dilakukan dengan menginjeksikan arus sebesar $10\mu\text{A}$ pada bahan uji dengan rentang frekuensi 0.1Hz – 1MHz . Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengukuran impedansi listrik lebih stabil diperoleh dengan menggunakan rangkaian injeksi arus tipe *Howland* termodifikasi. Hal ini karena pada rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi kapasitansi alat ukur mampu direduksi oleh model rangkaian dengan baik sehingga hasil pengukuran lebih spesifik terhadap bahan uji.

Kata kunci : Injeksi arus, *Howland Current Source*, *Floating Current Source*



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF ELECTRICAL IMPEDANCE MEASUREMENT RESULTS USING INJECTION CURRENT METHOD FLOATING AND HOWLAND

ABSTRACT

One method often used for the measurement of material electrical impedance is the current injection method. The current injection is performed by injecting the alternating current (AC) on material and then measured the voltage as a function of impedance accordance to Ohm's Law. Comparison and analysis of electrical impedance measurement result have been done in this study using several current source types i.e Floating, Howland and Howland modified. The measurements have done by injecting a current $10\mu\text{A}$ into several materials using frequency range from 0.1Hz to 1MHz. The study results represent the electrical impedance measurement more stable by using the Howland modified circuit. Because the capacitive reactance in this circuit could be reduced by the circuit model so that it is more specific for the material test.

Keywords : Current injection, Howland Current Source, Floating Current Source



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan skripsi sesuai dengan waktu yang telah direncanakan. Shalawat dan salam kami haturkan kepada Nabi Muhammad SAW. Dengan terselesaikannya penulisan laporan skripsi ini, penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu baik secara moril maupun material, baik secara langsung maupun tidak langsung pada kelancaran pengerjaan skripsi. Terimakasih saya sampaikan khususnya kepada:

1. Kedua orang tua, Ayah dan Ibu serta Adik yang telah memberikan bantuan materiil dan dukungan yang besar demi kelancaran pengerjaan penelitian ini.
2. Bapak Dr. Eng Didik Rahadi Santoso, M.Si selaku pembimbing pertama yang telah meluangkan waktu untuk membimbing dan mengarahkan penulis selama proses penelitian serta selalu memotivasi Penulis untuk tetap semangat.
3. Bapak Chomsin S. Widodo, S.Si., M.Si., Ph.D selaku pembimbing kedua yang telah memberikan arahan dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Agus Naba, Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik dari semester 1 sampai semester 8 yang selalu memberikan arahan serta motivasi.
5. Seluruh jajaran Dosen dan Staff Jurusan Fisika UB dimulai dari Ketua Jurusan, Dosen-dosen, Staff Tata Usaha, Kepala Laboratorium, dan juga para Laboran, karena telah memfasilitasi semua yang penulis butuhkan dalam proses pelaksanaan skripsi ini.
6. Rekan satu penelitian MCS grup (Dimmy Kurniawan I, M. Dripani Akbar, Wildan Mubarak, Arina Widda F, Citra Anggun Noorjanah, Riski Setiorini, Trisna Wahyunita, Mbak Amalia Cemara N, Mbak Bella Pitaloka, Mas Amry Priswanto) yang selalu bekerja bersama penulis dan memberikan semangat selama proses pengerjaan skripsi ini.
7. Teman-teman jurusan Fisika 2014 khususnya prodi Instrumentasi 2014 yang selalu memberi semangat untuk penulis.
8. Teman baik penulis Dwi Aprilia M, Maulidiah, Nur Khairati, Septi Dwi Lestari, Mentari Lalan R, Lusita Sulandari, Diah Utami, dan Jias Oktavia M yang selalu memberikan semangat dan motivasi.

9. Keluarga Kost Sengguruh 23 (Mbak Nia, Mbak Ulfa, Yane, Sintia, dan Arum) yang senantiasa menemani dan memberikan semangat.
10. Seluruh pihak terkait yang tidak bisa Penulis sebutkan satu persatu, terimakasih atas segala bantuan dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu penulis memohon maaf apabila ada kesalahan selama pengerjaan penelitian dan penulisan laporan skripsi ini. Semoga skripsi ini bermanfaat dan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Malang, 26 Juni 2018



Penulis

ACKNOWLEDGEMENT

Penelitian ini merupakan bagian dari hibah penelitian PUPPT tahun 2017 dengan nomor kontrak: 054/SP2H/LT/DRPM/2018, tanggal 12 Maret 2018 atas nama Dr.Eng Didik Rahadi Santoso, M.Si, dkk, yang berjudul *“Evaluasi Eksperimental Mekanisme Kerusakan Jaringan Sel Akibat Terkontaminasi Zat Beracun Dan Paparan Radiasi Menggunakan Parameter Dispersi Impedansi Kelistrikannya”*.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PERNYATAAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
ACKNOWLEDGEMENT	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Impedansi Listrik	3
2.2 Biolistrik	5
2.3 <i>Howland Current Source</i>	6
2.4 <i>Floating Current Source</i>	10
2.6 Rangkaian V to I Converter	11
2.7 Operational Amplifier (Op-Amp).....	11
2.7.1 LF351	12
2.7.2 LF353.....	13
2.7.3 LF357.....	14
2.7.4 LF444.....	15
2.8 Penguat Instrumentasi	16
BAB III METODE PENELITIAN.....	19
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	19
3.2 Tahapan Penelitian	19
3.2.1 Desain Sistem Instrumentasi	20
3.2.2 Desain <i>Hardware</i>	21
3.2.4 Pengujian Alat.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Hasil Desain Alat	27
4.2 Pengujian Alat.....	31

4.3 Pengujian Sistem Keseluruhan	35
4.3.1 Pengujian Dengan Variasi Panjang Kabel	36
4.3.2 Pengujian Dengan Elektroda jarum	42
4.3.3 Pengujian dengan Bahan Uji Madu	44
4.5 Hubungan Impedansi dengan Frekuensi	46
BAB V PENUTUP	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	51
DAFTAR LAMPIRAN	53



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian paralel antara resistor dengan kapasitor	3
Gambar 2.2 Rangkaian seri resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C) (Giancoli,2001).....	4
Gambar 2.3 Grafik hubungan antara frekuensi dengan impedansi (Liu, 2006).	5
Gambar 2.4 Rangkaian <i>Howland Current Source</i> (Islam, dkk., 2013)	6
Gambar 2.5 Rangkaian <i>non inverting</i>	7
Gambar 2.6 Modifikasi <i>Howland Current Source</i> (Batra and Kapoor, 2012).	9
Gambar 2.7 Rangkaian <i>Floating Current Source</i> (Bouchaala,2016).	10
Gambar 2.8 <i>Operational Amplifier</i> (Palendeng, 2012).	12
Gambar 2.9 Skema Sederhana IC LF351 (Instruments and National Semiconductor, 1998).	12
Gambar 2.10 Respon frekuensi LF351	13
Gambar 2.11 Skema Sederhana IC LF353 (Texas Instrument, 1998)	14
Gambar 2.12 Skema Sederhana IC LF357 (National Semiconductor, 2001).	15
Gambar 2.13 Skema IC LF444 (Texas, 2013)	16
Gambar 2.14 Skema Sederhana IC AD620 (Analog Devices, 2016).	16
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	19
Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Pengukuran	20
Gambar 3.3 Rangkaian <i>Howland Current Source</i>	22
Gambar 3. 4 Rangkaian Modifikasi <i>Howland Current Source</i>	24
Gambar 3.5 Rangkaian <i>Floating Current Source</i>	26
Gambar 4.1 Hasil desain Alat <i>Howland Current Source</i>	27
Gambar 4.2 Hasil Desain Alat Modifikasi <i>Howland Current Source</i>	28
Gambar 4.3 Hasil Desain Alat <i>Floating Current Source</i>	29
Gambar 4.4 Konfigurasi Penggunaan Alat	30
Gambar 4.5 Konfigurasi alat saat pengambilan data	31
Gambar 4.6 Grafik pengujian dengan nilai $R=100k\Omega$	32
Gambar 4.7 Grafik pengujian dengan $R=100k$ paralel $C=100nF$	33

Gambar 4.8 Grafik nilai impedansi listrik larutan air kran dengan panjang kabel 5 cm.....	39
Gambar 4.9 Grafik nilai impedansi listrik larutan air kran dengan panjang kabel 10 cm.....	40
Gambar 4.10 Grafik nilai impedansi listrik larutan air kran dengan panjang kabel 15 cm.....	41
Gambar 4.11 Grafik nilai impedansi listrik menggunakan elektroda jarum.	43
Gambar 4.12 Grafik nilai impedansi listrik pada bahan uji madu menggunakan IDT.....	45
Gambar 4.13 Grafik hubungan antara frekuensi dan impedansi listrik pada air dengan panjang kabel 5 cm.....	46
Gambar 4.14 Rangkaian Listrik ekuivalen model Randels.	47



DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Nilai amplitudo arus untuk beberapa nilai Rs	25
Tabel 4.1 Hasil pengujian dengan perhitungan analisis rangkaian ..	35





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data hasil pengukuran impedansi dengan panjang kabel 5 cm.....	53
Lampiran 2. Data hasil pengukuran impedansi listrik dengan panjang kabel 10 cm.	54
Lampiran 3. Data hasil pengukuran impedansi listrik dengan panjang kabel 15 cm.	55
Lampiran 4. Data hasil pengukuran impedansi listrik dengan elektroda jarum.....	56
Lampiran 5. Data hasil pengukuran impedansi listrik pada madu dengan menggunakan sensor IDT.	57
Lampiran 6. Gambar Pengujian alat	58





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu metode yang sering digunakan untuk mengukur impedansi listrik adalah metode injeksi arus. Metode ini sering digunakan dan diminati karena memiliki biaya yang murah, bersifat non invasif atau tidak merusak bahan yang digunakan sebagai sampel ukur, dan sederhana dalam pembuatan perangkat kerasnya. Pada pengukuran karakteristik kelistrikan suatu bahan, konsep dasar yang digunakan adalah pengukuran besar resistivitas suatu objek. Proses pengukuran tersebut dilakukan dengan menginjeksikan arus bolak-balik (AC) dan mengukur tegangan sesuai dengan prinsip dasar Hukum Ohm. Dengan demikian, sumber arus merupakan elemen terpenting dalam proses pengukuran (Batra and Kapoor, 2012).

Sumber arus merupakan piranti yang dapat menghasilkan dan mempertahankan nilai arus tanpa terpengaruh oleh besarnya hambatan pada beban. Pada umumnya sumber arus bersifat *adjustable* (nilai keluarannya bisa diatur sesuai dengan kebutuhan). Sumber arus yang sering digunakan adalah *Voltage Controlled Current Source* (VCCS), dengan prinsip nilai arus ditentukan dengan mengontrol tegangan masukannya. *Voltage Controlled Current Source* (VCCS) dapat dibuat dengan beberapa metode, yaitu *Floating Current Source* dan *Howland Current Source* (Bertemes-Filho et al., 2012).

Rangkaian sumber arus tipe *Floating* adalah rangkaian sumber arus dengan kontrol tegangan dan beban yang tidak terhubung ke *ground*. Sedangkan rangkaian sumber arus tipe *Howland* merupakan rangkaian sumber arus dengan kontrol tegangan dan beban yang terhubung ke *ground*. Pada pengaplikasiannya, kelemahan dari rangkaian sumber arus tipe *Howland* yaitu ketika mengubah nilai arus injeksi harus mengubah semua nilai resistor pada rangkaian diferensial, sehingga hal ini menjadi tidak praktis. Sedangkan kelemahan dari rangkaian sumber arus *Floating* yaitu beban yang mengambang sehingga tidak dapat terhubung ke sumber arus yang dapat mempengaruhi sistem sehingga hasil pengukuran tidak stabil (Batra and Kapoor, 2012). Oleh karena itu, diusulkan rangkaian sumber arus *Howland* termodifikasi untuk memudahkan pemilihan

repository.ub.ac.id

arus injeksi yaitu cukup dengan mengganti nilai resistor *selector* tanpa mengubah nilai resistor pada rangkaian. (Bertemes-Filho, Felipe and Vincence, 2013).

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka pada penelitian ini dilakukan komparasi pengukuran impedansi listrik dengan rangkaian sumber arus tipe *Howland*, Modifikasi *Howland*, dan *Floating* untuk mengetahui hasil pengukuran impedansi listrik dan mendapatkan sumber arus AC terbaik sehingga hasil pengukuran impedansi bahan menjadi optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka didapatkan beberapa pokok rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang bangun sumber arus tipe *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi ?
2. Bagaimana melakukan karakterisasi hasil pengukuran impedansi listrik dengan menggunakan sumber arus tipe *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk membuat ruang lingkup penelitian menjadi lebih jelas. Maka pada penelitian ini akan diberikan batasan sebagai berikut :

1. IC op-amp yang digunakan untuk membangun sumber arus adalah LF351 dan keluarganya.
2. Rentang frekuensi yang digunakan yaitu 0.1Hz – 1MHz.
3. Tidak dibahas secara mendalam tentang probe atau elektroda yang digunakan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perbedaan hasil pengukuran impedansi listrik dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi.

1.5 Manfaat Penelitian

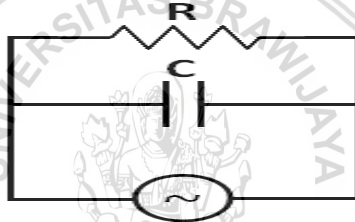
Dilakukannya penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumber arus yang lebih baik dalam pengukuran nilai impedansi listrik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Impedansi Listrik

Impedansi listrik secara umum didefinisikan sebagai total hambatan pada rangkaian elektronik ketika diberikan arus bolak-balik (AC). Pada sebuah unsur dasar yaitu komponen resistor R, kapasitor C, dan induktor L, besar hambatan AC disebut reaktansi X. Untuk komponen resistor nilai hambatan AC-nya adalah $X_R = R$, untuk komponen kapasitor nilai hambatan AC-nya adalah $X_C = 1/j\omega C$ disebut sebagai reaktansi kapasitif, dan untuk komponen induktor nilai hambatan AC-nya adalah $X_L = j\omega L$ disebut sebagai reaktansi induktif seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian paralel antara resistor dengan kapasitor

Resistansi dari kapasitansi (C) dapat dirumuskan sebagai $C = I/(j\omega C)$, dimana j merupakan bilangan imajiner. Sedangkan untuk rangkaian (R_p) dan kapasitansi (reaktansi $1/\omega C_p$) yang dirangkai paralel dapat diperoleh dari hukum Kirchoff.

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{1/j\omega C_p} \quad (2.1)$$

Dari persamaan (2.1) dapat diperoleh :

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{R_p}{1 + (j\omega R_p C_p)} \quad (2.2)$$

Apabila secara seri pada rangkaian RC ditambahkan R, maka diperoleh :

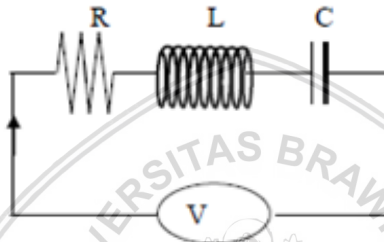
$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + (j.2\pi f . R_p . C_p)} \quad (2.3)$$

Diketahui bahwa $\omega=2\pi f$, real (Z_{re}), dan imajiner (Z_{im}) dari impedansi kompleks Z adalah :

$$Z_{re} = R_s + \frac{Rp}{1 + \omega^2 \cdot Rp^2 \cdot Cp^2} \quad (2.4)$$

Dan

$$Z_{im} = \frac{Rp^2 \cdot Cp \cdot \omega}{1 + \omega^2 \cdot Rp^2 \cdot Cp^2} \quad (2.5)$$



Gambar 2.2 Rangkaian seri resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C) (Giancoli,2001)

Berdasarkan gambar 2.2 apabila frekuensi bertambah, X_L bertambah, dan X_C berkurang. Maka pada saat X_L dan X_C sama dan $X_L - X_C$ adalah nol. Pada frekuensi ini nilai impedansi adalah (Giancoli, 2001) :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.6)$$

Atau

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL - 1/2\pi fC)^2} \quad (2.7)$$

Keterangan :

Z = impedansi (Ω)

R = hambatan (Ω)

X_L = reaktansi induktif (Ω)

X_C = reaktansi kapasitif (Ω)

f = frekuensi (Hz)

L = induktansi (H)

C = kapasitas kapasitor (F)

2.2 Biolistrik

Jaringan biologis mempunyai reaktansi kapasitif yang berasal dari membran sel, tetapi yang mendominasi adalah sifat resistansi dari jaringan biologis itu sendiri. Sifat dari kapasitor dipengaruhi oleh frekuensi, sehingga pemilihan frekuensi akan berpengaruh terhadap hasil yang akan diperoleh (Chowdhury et al.2015).

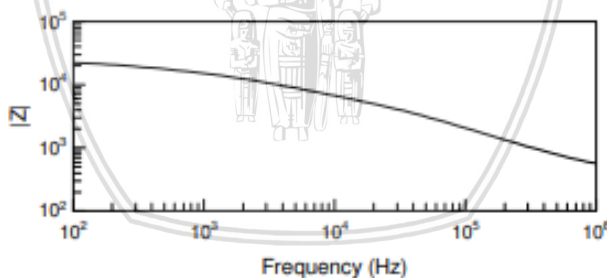
Nilai impedansi dari jaringan biologis merupakan fungsi kompleks yang bergantung pada frekuensi. Nilai impedansi jaringan biologis dapat dituliskan sebagai :

$$Z = R + jX \quad (2.8)$$

Dimana R adalah resistansi dari jaringan biologis, X adalah nilai reaktansi total dari jaringan biologis dan j menunjukkan bilangan imajiner. Hubungan antara nilai impedansi dengan sudut fase (θ) adalah sebagai berikut (Inaba et al.1995) :

$$R = Z \cos \theta \quad (2.9)$$

$$X = Z \sin \theta \quad (2.10)$$

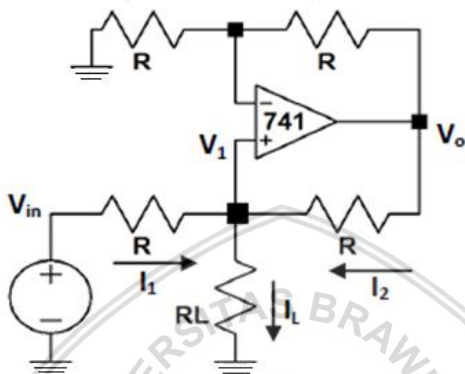


Gambar 2.3 Grafik hubungan antara frekuensi dengan impedansi (Liu, 2006).

Berdasarkan gambar 2.3 nilai impedansi pada jaringan biologis dipengaruhi oleh frekuensi. Semakin besar frekuensi yang diberikan, maka nilai impedansi yang terukur akan semakin kecil. Perubahan nilai impedansi ini memberikan informasi mengenai struktur dari membran, cairan ekstraseluler, cairan intraseluler, dan cairan intraseluler jaringan biologis (Liu, 2006).

2.3 Howland Current Source

Howland Current Source adalah sumber arus tegangan terkontrol dengan beban yang terhubung ke *ground*. Secara sederhana rangkaian *Howland Current Source* ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian *Howland Current Source* (Islam, dkk., 2013)

Gambar 2.4 merupakan rangkaian *Howland Current Source* dimana pada rangkaian ini satu terminal beban R_L terhubung ke *ground* dan dan arus beban dikontrol oleh tegangan input V_{in} . Pada rangkaian ini terlebih dahulu ditentukan tegangan V_1 pada terminal input non inverting dan kemudian menetapkan hubungan antara V_1 dan arus beban.

Berdasarkan persamaan KCL (*Kirchoff Current Law*) yang menyatakan $I_{in} = I_{out}$.

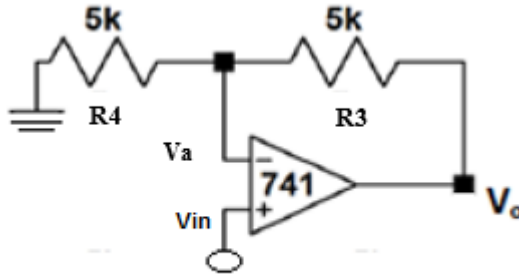
$$I_1 = \frac{V_{in} - V_1}{R_1}, \text{ dan } I_2 = \frac{V_{out} - V_1}{R_2} \quad (2.11)$$

Maka,

$$I_L = I_1 + I_2 \quad (2.12)$$

$$I_L = \frac{V_{in} - V_1}{R_1} + \frac{V_{out} - V_1}{R_2} \quad (2.13)$$

Berdasarkan analisis rangkaian *non inverting* :



Gambar 2.5 Rangkaian *non inverting*

Diketahui bahwa arus yang mengalir pada I_4 dan I_3 adalah :

$$I_4 = \frac{0 - V_a}{R_4}, \text{ dan } I_3 = \frac{V_a - V_{out}}{R_3} \quad (2.14)$$

$$I_4 = I_3 \quad (2.15)$$

$$\frac{0 - V_a}{R_4} = \frac{V_a - V_{out}}{R_3} \quad (2.16)$$

$$\frac{-V_a}{R_4} = \frac{V_a - V_{out}}{R_3} \quad (2.17)$$

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{V_a - V_{out}}{V_a} \quad (2.18)$$

$$\frac{R_3}{R_4} = 1 - \frac{V_{out}}{V_a} \quad (2.19)$$

Sehingga diperoleh V_{out} :

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_{in} \quad (2.20)$$

Anggap $R_3 = R_4 = R$

$$\text{Maka, } V_{out} = 2 V_{in} \text{ atau } V_{in} = \frac{V_{out}}{2} \quad (2.24)$$

Pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 diketahui bahwa $V_1 = V_{in}$
Maka pada persamaan (2.24) disubstitusikan ke persamaan (2.13) :

$$I_L = \frac{V_{in} - V_{out}/2}{R_1} + \frac{V_{out} - V_{out}/2}{R_2} \quad (2.25)$$

Anggap $R_1 = R_2 = R$

$$I_L = \left(\frac{V_{in} - V_{out}/2}{R} + \frac{V_{out} - V_{out}/2}{R} \right) \quad (2.26)$$

$$R I_L = \left(\frac{V_{in} - V_{out}/2}{R} + \frac{V_{out} - V_{out}/2}{R} \right) R \quad (2.27)$$

$$R I_L = V_{in} - \frac{V_{out}}{2} + \frac{V_{out}}{2} \quad (2.28)$$

$$R I_L = V_{in} \quad (2.29)$$

$$\text{Sehingga } I_L = \frac{V_{in}}{R} \quad (2.30)$$

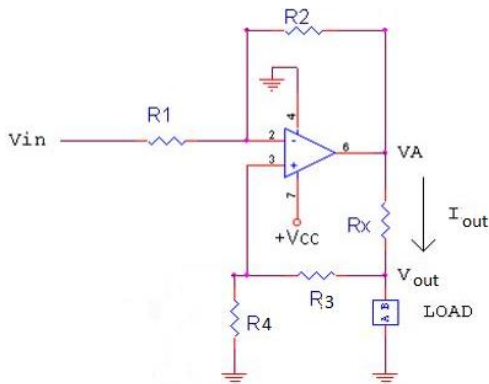
Hal ini berarti arus pada beban bergantung pada tegangan input (V_{in}) dan resistor R, bukan pada resistansi beban (R_L).

Keterangan :

- V_{out} : Tegangan keluaran (V)
- I_L : Arus pada load (A)
- R : Hambatan (Ω)
- V_{in} : Tegangan masukan (V)

(Islam, Reza and Kiber, 2013).

Untuk memperbaiki kinerja dari rangkaian *Howland Current Source* maka diusulkan modifikasi dari rangkaian *Howland Current Source* seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Modifikasi *Howland Current Source* (Batra and Kapoor, 2012).

Berdasarkan Gambar 2.6 adalah rangkaian dari modifikasi *Howland Current Source*. Tegangan yang melewati V_A dapat dirumuskan :

$$V_A = \frac{-R_2}{R_1} V_{in} + V_{out} \left(\frac{R_4}{R_4 + R_x} \right) \left(1 + \frac{R_x}{R_4} \right) \quad (2.31)$$

Pada persamaan 2.31 dapat disederhanakan :

$$V_A = \frac{-R_2}{R_1} V_{in} + V_{out} \quad (2.32)$$

$$V_A - V_{out} = \frac{-R_2}{R_1} V_{in} \quad (2.33)$$

Berdasarkan pada hukum Ohm, diperoleh arus keluaran pada persamaan :

$$I_{out} = \frac{V_A - V_{out}}{R_x} \quad (2.34)$$

Atau,
$$I_{out} R_x = V_A - V_{out} \quad (2.35)$$

Persamaan 2.33 dapat disubstitusikan ke persamaan 2.35, Sehingga diperoleh nilai arus sebesar :

$$I_{out} = - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{R_x} V_{in} \quad (2.36)$$

Keterangan :

V_{out} : Tegangan keluaran (V)

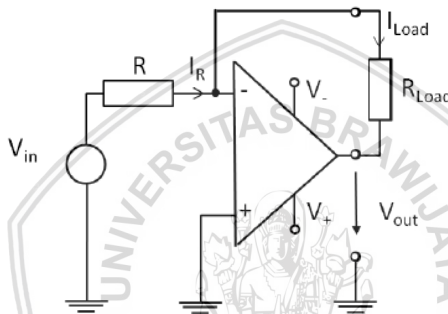
R_x : Resistor selector (Ω)

R_{Load} : Resistor beban (Ω)

V_{in} : Tegangan masukan (V)

2.4 Floating Current Source

Floating Current Source merupakan sumber arus tegangan terkontrol dengan beban yang tidak terhubung ke *ground*. Rangkaian sederhana dari *Floating Current Source* dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Rangkaian *Floating Current Source* (Bouchaala,2016).

Berdasarkan pada Gambar 2.7 sumber arus dikendalikan oleh penguat operasional tunggal dengan beban mengambang (*floating*) yang dikenal sebagai beban umpan balik dalam *loop* sumber arus. Impedansi keluaran yang dihasilkan bergantung pada frekuensi tinggi pada nilai beban dan resistor R, dan juga berdasarkan karakteristik dari operasional amplifier (Bouchaala, 2016).

Sehingga arus yang melewati R dirumuskan ke dalam persamaan 2.37.

$$I_R = \frac{V_{in}}{R} \quad (2.37)$$

Dengan arus yang sama mengalir melalui beban (R_{load}), sehingga dapat dirumuskan :

$$I_{load} = \frac{V_{in}}{R} \quad (2.38)$$

Sedangkan, tegangan *output* pada *amplifier* dirumuskan sebagai berikut :

$$V_{out} = - \frac{R_{load}}{R} V_{in} \quad (2.39)$$

Keterangan :

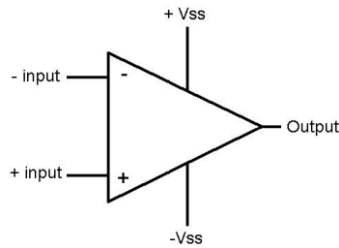
V_{out} : Tegangan keluaran (V)
 R_{Load} : Resistor pada beban (Ω)
 V_{in} : Tegangan masukan (V)

2.6 Rangkaian V to I Converter

Voltage to current (V to I) converter atau disebut dengan konverter tegangan ke arus suatu rangkaian yang mengubah sumber tegangan menjadi sumber arus. Dalam hal ini, pengertian dari sumber arus adalah titik yang memberi arus tertentu tanpa memperhatikan impedansi beban. Sumber arus akan memberikan arus yang ditentukan pada beban dengan berbagai impedansi, sehingga tegangan akan bervariasi sesuai dengan impedansi beban. Salah satu contoh V to I *converter* yaitu pada sirkuit untuk mentransmisikan sinyal jauh. Apabila menggunakan sinyal tegangan, maka penerima akan mengalami penurunan tegangan pada sinyal. Sedangkan apabila menggunakan sumber arus, maka tidak akan terjadi demikian. Aplikasi yang memanfaatkan rangkaian V to I *converter* yaitu dijumpai dalam bidang instrumentasi industri untuk komunikasi antara sistem sensor dan pengontrol, atau antara pengontrol dan aktuator (Prakasa, 2017).

2.7 Operational Amplifier (Op-Amp)

Penguat instrumentasi atau *operational amplifier* (op-amp) adalah sebuah komponen elektronika yang tersusun dari resistor, diode, dan transistor. Penyusunan op-amp disusun dalam sebuah rangkaian yang terintegrasi atau *Integrated Circuit (IC)* yang dalam aplikasinya digunakan sebagai penguat (Nuryanto, 2017). *Op-amp* dalam rangkaian biasanya digambarkan seperti pada gambar 2.8.

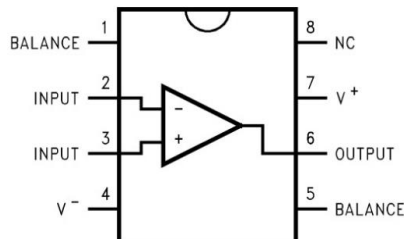


Gambar 2.8 *Operational Amplifier* (Palendeng, 2012).

Berdasarkan Gambar 2.8 merupakan blok rangkaian *op-amp* yang terdiri dari dua masukan dan satu keluaran dimana tegangan keluarannya proporsional terhadap perbedaan tegangan antara kedua masukannya. Dalam bidang elektronika op-amp digunakan sebagai penguat sinyal-sinyal linier dan non linier terutama dalam sistem-sistem pengaturan dan pengendalian, instrumentasi, dan komputasi analog. Aplikasi op-amp yang sering digunakan adalah rangkaian *inverter*, *non inverter*, *integrator*, dan *differensial* (Palendeng, dkk., 2012).

2.7.1 LF351

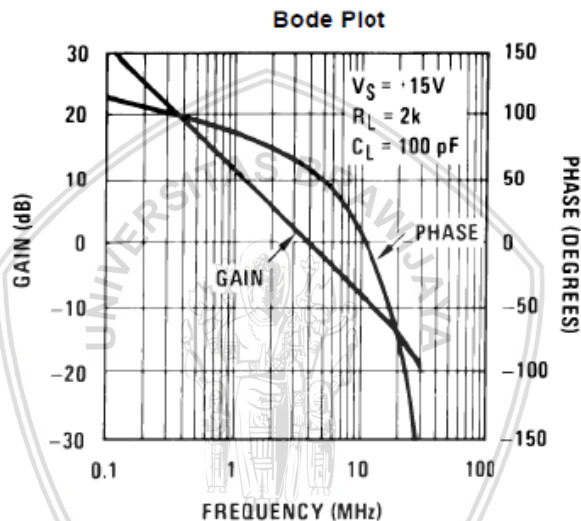
IC LF351 merupakan salah satu penguat operasional *input* JFET berkecepatan tinggi dengan penguat masukan tegangan internal (teknologi BI-FET IITM). LF351 membutuhkan suplay arus yang rendah untuk mempertahankan *bandwidth* yang besar dan perubahan tegangan yang cepat. Selain itu, perangkat *input* JFET tegangan tinggi cocok dengan *input* bias yang sangat rendah dan arus *offset* (Instruments and National Semiconductor, 1998). Konfigurasi pin pada IC LF351 dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Skema Sederhana IC LF351 (Instruments and National Semiconductor, 1998).

Berikut adalah spesifikasi dari LF351 :

- *Internally trimmed offset voltage* 10 mV
- *Low input bias current* 50 pA
- *Low input noise voltage* $25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- *Low input noise current* $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- *Wide gain bandwidth* 4 MHz
- *High slew rate* 13 V/ μs
- *Low supply current* 1.8 mA
- *High input impedance* 10^{12}



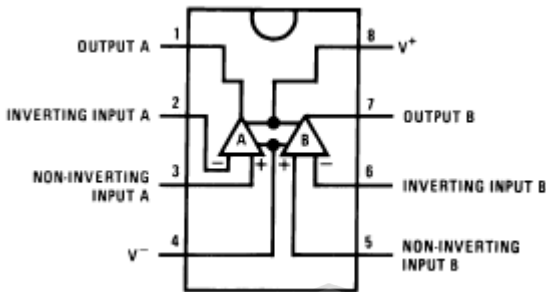
Gambar 2.10 Respon frekuensi LF351

Gambar 2.10 adalah respon frekuensi dari IC LF351 yang menunjukkan bahwa IC pada frekuensi sekitar 4MHz sinyal akan mengalami penurunan atau *cut-off*. Hal ini dikarenakan kemampuan dari LF351 hanya dapat bekerja pada frekuensi dibawah 4MHz dan tidak dapat merespon frekuensi tinggi diatas 4MHz (Instrument and National Semiconductor, 1998).

2.7.2 LF353

IC LF353 adalah salah satu jenis IC penguat instrumentasi *dual* op-amp yang mempunyai pin 8 kaki sehingga pekerjaan dua IC dapat dikerjakan hanya dengan satu IC. Selain itu, IC LF353 memiliki harga yang murah (*low cost*), berkecepatan tinggi, *supply* tegangan

maksimal untuk V_{cc}^+ sebesar 18V dan untuk V_{cc}^- sebesar -18V (Texas Instrument, 1998). Konfigurasi pin pada IC LF353 dapat dilihat pada Gambar 2.11.



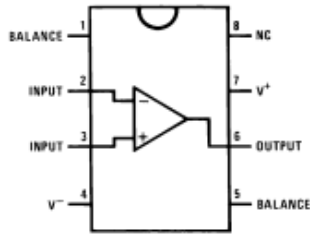
Gambar 2.11 Skema Sederhana IC LF353 (Texas Instrument, 1998)

Spesifikasi dari LF353 adalah sebagai berikut :

- *Low input bias current* 50 pA
- *Low input noise voltage* $25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- *Low input noise current* $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- *Wide gain bandwidth* 4 MHz
- *High input impedance* $10^{12} \Omega$

2.7.3 LF357

IC LF357 merupakan penguat operasional masukan JFET monolitik pertama yang menggabungkan JFET tegangan tinggi yang sesuai dengan tingkat pada chip yang dengan transistor bipolar standar (Teknologi BI-FET). Penguat ini mempunyai *low input bias*, *offset current/low offset voltage* dan *offset voltage drift*. IC ini dirancang untuk laju perubahan tegangan yang tinggi, *bandwidth* yang lebar, dan waktu penyelesaian yang sangat cepat (National Semiconductor, 2001). Konfigurasi pin pada IC LF357 dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Skema Sederhana IC LF357 (National Semiconductor, 2001).

Berikut adalah spesifikasi dari IC LF357 :

1. Aplikasi

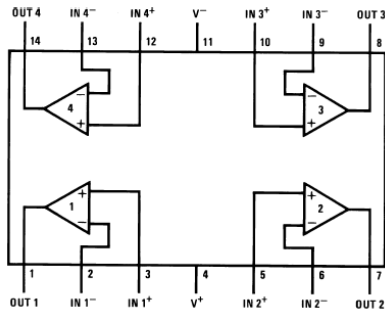
- *Precision high speed integrator*
- *Fast Digital to Analog and Analog to Digital Converter*
- *High impedance buffers*
- *Wideband, low noise, low drift amplifier*

2. Common Feature

- *Low input bias current 30 pA*
- *Low input offset current 3 pA*
- *High input impedance $10^{12} \Omega$*
- *Low input noise current $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$*
- *High common-mode rejection ratio 100 dB*
- *Large DC voltage gain 106 dB*

2.7.4 LF444

IC LF444 adalah penguat operasional daya rendah yang menyediakan karakteristik AC sebagai standar industri LM148 yang dapat meningkatkan karakteristik DC dari LM148. IC ini memiliki *bandwidth* yang lebar, laju perubahan tegangan, dan penguatan dengan beban mencapai 10 k Ω , memiliki tegangan masukan *input* ekuivalen yang sangat rendah untuk penguat daya rendah. Selain itu, perangkat *input* JFET tegangan tinggi dari LF444 ini dapat mengurangi *input* bias dan arus *offset* (Instruments, 1995). Konfigurasi IC LF444 dapat dilihat pada Gambar 2.13.



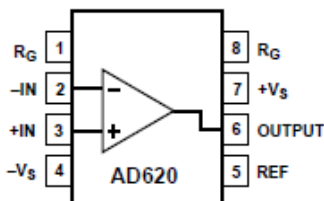
Gambar 2.13 Skema IC LF444 (Texas, 2013)

Berikut adalah spesifikasi dari IC LF444 :

- $\frac{1}{4}$ supply current of a LM148 : 200 $\mu\text{A}/\text{amplifier (max)}$
- Low input bias current : 50 pA (max)
- High gain bandwidth : 1 MHz
- High slew rate : 1 V/ μs
- Low noise voltage for low power 35 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Low input noise current 0.01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- High input impedance : $10^{12} \Omega$
- High gain : 50k (min)

2.8 Penguat Instrumentasi

AD620 adalah *instrumentasi amplifier* yang dikemas dalam bentuk IC (*Integrated Circuit*) yang dibuat berdasarkan pendekatan rangkaian op-amp klasik. Rangkaian ini memiliki harga yang relatif murah, tingkat akurasi tinggi yang hanya membutuhkan satu resistor eksternal untuk mengatur penguatan dengan rentang 1 sampai 10.000 kali (Analog Device, 1999). Konfigurasi pin pada IC AD620 seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Skema Sederhana IC AD620 (Analog Devices, 2016).

Berikut adalah spesifikasi dari AD620 :

1. Mudah digunakan
 - *Gain* diatur dengan satu resistor *eksternal* (*gain* kisaran 1 sampai 10.000 kali)
 - *Range power supply* lebar ($\pm 2,3$ V sampai ± 18 V)
 - Kinerja lebih tinggi dari desain 3 op-amp penguat instrumentasi
 - Daya rendah, arus yang di *suplay* maksimal 1,3 mA
2. Kinerja DC yang baik (grade B)
 - Max 50 μ V, *input offset voltage*
 - Max 0,6 μ V, *input offset drift*
 - Max 1 nA, *input bias current*
 - Min 100 dB CMRR (G=10)
3. *Noise* Rendah
 - 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 KHz, *input voltage noise*
 - 0,28 μ V p-p *noise* (0,1 Hz sampai 10 Hz)
4. Spesifikasi AC baik
 - *Bandwidth* 120 KHz (G=100)
 - 15 μ s waktu penyelesaian sampai 0,01 %



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

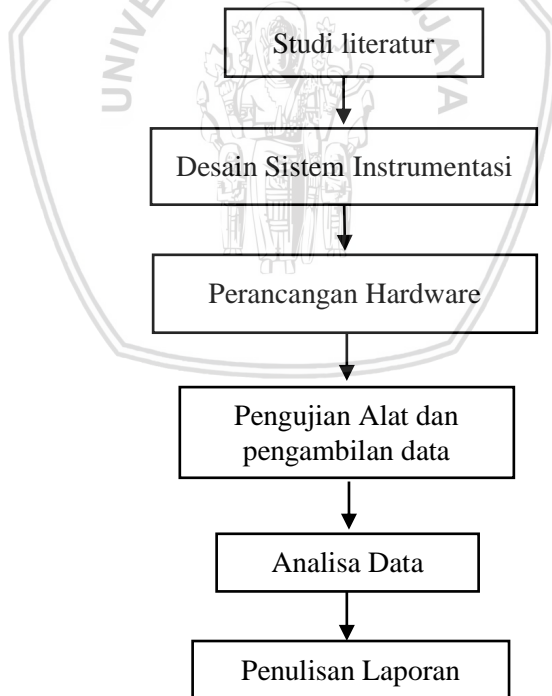
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari sampai Mei 2018 di Laboratorium *Measurement Circuit and System* (MCS) Gedung Biomol lantai 3, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya.

3.2 Tahapan Penelitian

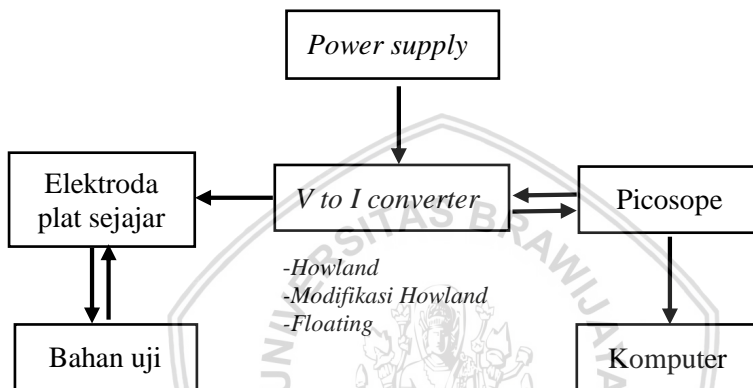
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan tertentu, hal ini bertujuan agar penelitian terlaksana dengan baik. Tahapan proses pelaksanaan penelitian ini ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2.1 Desain Sistem Instrumentasi

Sesuai dengan diagram alir penelitian, setelah proses studi literatur dilakukan maka tahapan selanjutnya adalah mendesain rangkaian instrumentasi. Sebelum mendesain rangkaian instrumentasi perlu dilakukan perancangan sistem secara garis besar untuk mengetahui sistem yang akan dirancang secara keseluruhan. Secara garis besar sistem yang akan dirancang ditunjukkan pada blok diagram seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Pengukuran

Blok diagram pada Gambar 3.2 adalah sistem instrumentasi secara keseluruhan yang terdiri dari elektroda atau *probe* plat sejajar, rangkaian V to I Converter yang terdiri dari *Howland* dan *Floating Current Source*, *picoscope* sebagai akuisisi data, dan PC atau komputer sebagai penampil gelombang. Secara umum jalannya sistem pengukuran yaitu dengan menginjeksikan arus menggunakan rangkaian V to I Converter ke *probe* plat sejajar yang disusun secara *overlapping* pada bahan uji yaitu air.

Alat utama yang digunakan pada pengukuran yaitu *picoscope* S5000 yang merupakan sistem akuisisi data dengan kecepatan tinggi yang dilengkapi 4 *channel* serta terdapat sinyal generator AC yang dapat bekerja pada frekuensi tinggi yaitu 1MHz. Secara umum, prinsip kerja dari sistem pengukuran menggunakan *picoscope* yaitu sinyal generator yang terdapat pada modul *picoscope* diatur untuk menghasilkan tegangan sebesar 1 Volt (V_{in}) dengan frekuensi yang digunakan mulai 0.1Hz hingga 1MHz. Selanjutnya, modul rangkaian

V to I Converter mengubah tegangan menjadi arus pada frekuensi yang digunakan, dan arus tersebut selanjutnya diinjeksikan ke *probe* plat sejajar yang telah dicelupkan ke bahan uji yaitu air. Kemudian keluaran tegangan akan direkam oleh *channel A* pada *picoscope*, dan secara bersamaan *channel B* juga merekam tegangan sebagai referensi. Hasil keluaran yang telah direkam oleh *picoscope* selanjutnya akan ditampilkan ke komputer.

3.2.2 Desain *Hardware*

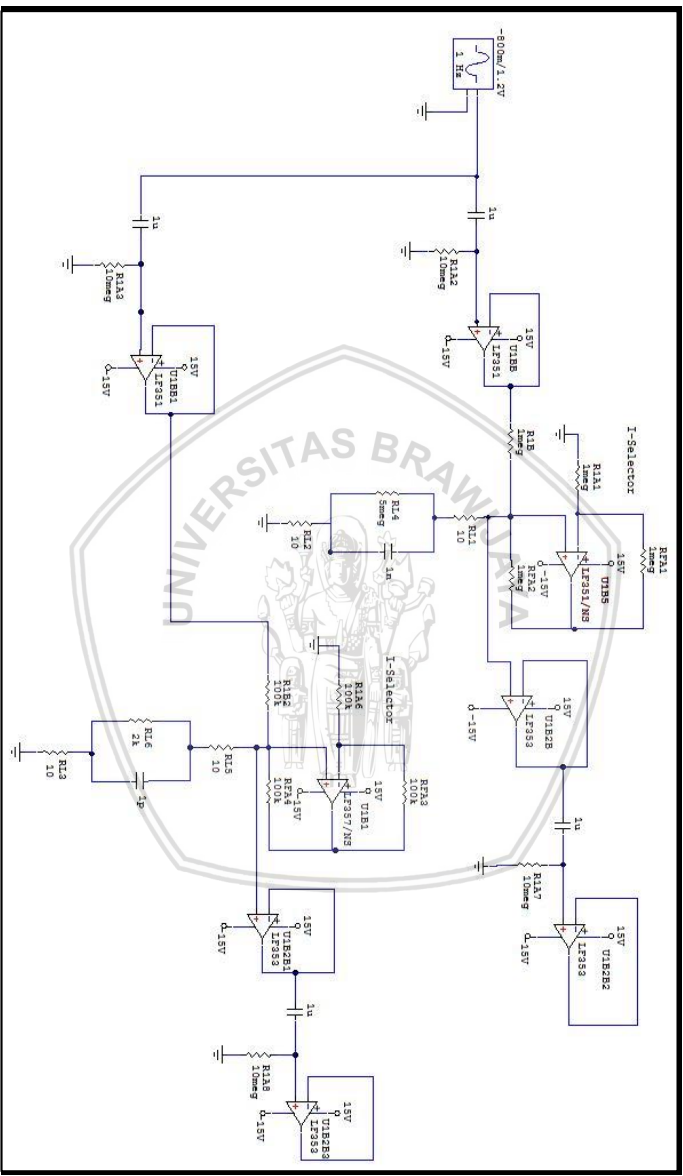
Desain *hardware* terlebih dahulu disimulasikan menggunakan *Software Circuit Maker* guna meminimalisir kesalahan yang terjadi. Setelah dilakukan simulasi rangkaian, maka akan dilakukan pendesainan *hardware*. Desain *hardware* yang akan dibuat yaitu *Howland*, *Howland* termodifikasi, dan *Floating*.

a. *Howland Current Source*

Howland Current Source merupakan rangkaian injeksi arus dengan sumber tegangan terkontrol dimana beban terhubung ke *ground*. Pada desain *Howland Current Source* dibuat 2 macam desain yaitu *Howland Current Source* dan Modifikasi *Howland Current Source* yang dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan 3.4.

Rangkaian *Howland Current Source* terdiri dari IC op-amp LF351 dan LF353. Untuk IC LF351 pada U1BB dan U1BB1 membentuk rangkaian *buffer* yang berfungsi untuk memperbesar impedansi masukan supaya sinyal-sinyal kecil dapat terbaca. Sedangkan pada U1B2B2 dan U1B2B3 digunakan sebagai *buffer* pada output. Selanjutnya pada IC LF351 pada U1B5 dan U1B3 membentuk rangkaian penguat diferensial. Op-amp yang digunakan adalah IC op-amp LF351 dan LF353 karena memiliki kelebihan pada impedansi *input* yang tinggi yaitu dapat bekerja secara stabil pada frekuensi 4 MHz. Selanjutnya yaitu dilakukan desain modifikasi *Howland Current Source* seperti pada Gambar 3.4.

Gambar 3.3 Rangkaian Howland Current Source.



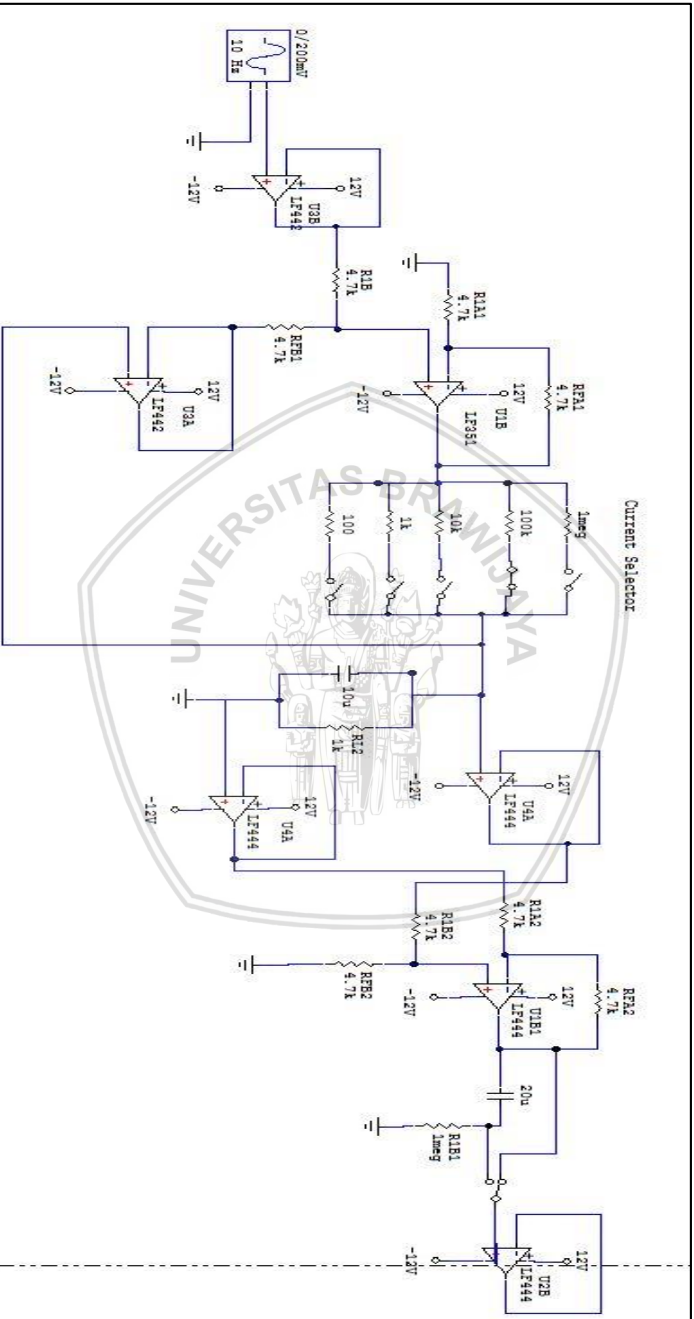
Desain dari rangkaian modifikasi *Howland Current Source* dapat dilihat pada Gambar 3.4. IC yang digunakan yaitu LF351 pada U3B yang membentuk rangkaian *buffer* yang berfungsi memperbesar impedansi masukan supaya sinyal-sinyal kecil dapat terbaca. Digunakan IC LF351 karena memiliki rentang *bandwidth* sampai dengan 4MHz. Selanjutnya pada U1B membentuk rangkaian penguat diferensial yang berfungsi untuk menguatkan sinyal masukan sebelum selanjutnya masuk ke *current selector*. Untuk menginjeksikan arus maka digunakan sebuah *current source*, yang merupakan sebuah konverter dari sumber tegangan yang diberikan beberapa resistor yaitu nilai $R=1k$ untuk arus sebesar 1mA, R sebesar 10k untuk arus sebesar 100 μ A, R sebesar 100k untuk arus sebesar 10 μ A, dan R sebesar 1M untuk arus sebesar 1 μ A. Digunakan nilai arus dalam orde mikro Ampere (μ A) karena pada pengukuran di bidang biofisika pengukuran dilakukan dalam orde mikro, hal ini dikarenakan objek yang diukur berupa elektrolit (cair). Selain *buffer* pada masukan, pada rangkaian U2A dan U4A membentuk rangkaian *buffer* pada output. IC yang digunakan adalah LF444 karena memiliki *bandwidth* yang dapat bekerja pada rentang frekuensi 1 MHz.

Rangkaian *buffer* tegangan yang menerima tegangan 1 volt dari sinyal generator diteruskan ke penguat diferensial *amplifier*. keluaran tegangan dari penguat diferensial *amplifier* dibagi dengan nilai hambatan yang dipilih (R_s) sesuai dengan keluaran arus yang diinginkan. Bentuk sinyal arus ini ideal dengan bentuk sinyal tegangan dan tanpa mengalami pergeseran fase. Hal ini dikarenakan R_s merupakan resistor murni dan tidak mempunyai reaktansi.

$$I_{out} = \frac{V_{diff}}{R_s} \quad (3.1)$$

Keterangan :

- I_{out} = Arus keluaran (A)
- V_{diff} = Tegangan differensial (V)
- R_s = Resistor selector (Ω)



Gambar 3. 4 Rangkaian Modifikasi Howland Current Source.

Berdasarkan persamaan 3.1 untuk keluaran V_{diff} 1 volt maka beberapa arus keluaran yang diperoleh berdasarkan konfigurasi nilai R_s ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Nilai amplitudo arus untuk beberapa nilai R_s

Resistor	Arus
10 k Ω	100 μ A
100 k Ω	10 μ A
1 M Ω	1 μ A
10 M Ω	0.1 μ A

b. *Floating Current Source*

Rangkaian *Floating Current Source* merupakan rangkaian injeksi arus dimana sumber arus dengan tegangan terkontrol sedangkan beban tidak terhubung ke *ground*. Pada gambar 3.5 merupakan Rangkaian *Floating Current Source* yang tersusun dari IC op-amp LF353, dan IC AD620 sebagai penguat instrumentasi. Pada IC LF353 membentuk rangkaian inverting antara R_1 dan R_{Load} . Nilai R_1 digunakan sebagai resistor input, sedangkan R_{Load} adalah sebagai bahan yang akan diukur. Sehingga tegangan keluaran diperoleh dengan menetapkan persamaan 3.2.

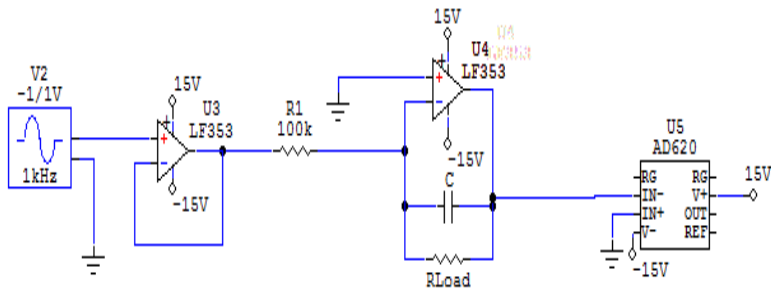
$$V_{out} = - \frac{R_{load}}{R_1} V_{in} \quad (3.2)$$

Keterangan :

V_{out} = Tegangan keluaran (V)

R_{load} = Resistor beban (Ω)

V_{in} = Tegangan masukan (V)



Gambar 3.5 Rangkaian *Floating Current Source*.

3.2.4 Pengujian Alat

Dilakukan pengujian alat dalam penelitian untuk mengetahui apakah rangkaian yang telah dibuat dapat bekerja dengan baik sesuai dengan keluaran alat dengan yang seharusnya.

a. Pengujian rangkaian sumber arus tipe *Howland* dan *Floating*

Pengujian rangkaian sumber arus tipe *Howland*, *Howland* termodifikasi, dan *Floating* dilakukan untuk mengetahui apakah arus listrik keluaran pada modul sudah sesuai dengan keperluan yang akan digunakan untuk injeksi arus pada *load* atau bahan. Cara yang dilakukan pada pengujian sumber arus yaitu dengan mengukur sinyal keluaran pada rangkaian sumber arus yang telah diberikan *load*. Digunakan *load* yang besar nilainya sama dengan nilai resistor untuk injeksi arusnya supaya hasil pengujian dapat terlihat. Pada pengujian ini digunakan *load* dengan nilai $R\ 100k\Omega$ untuk arus sebesar $10\mu A$.

b. Pengujian keseluruhan sistem.

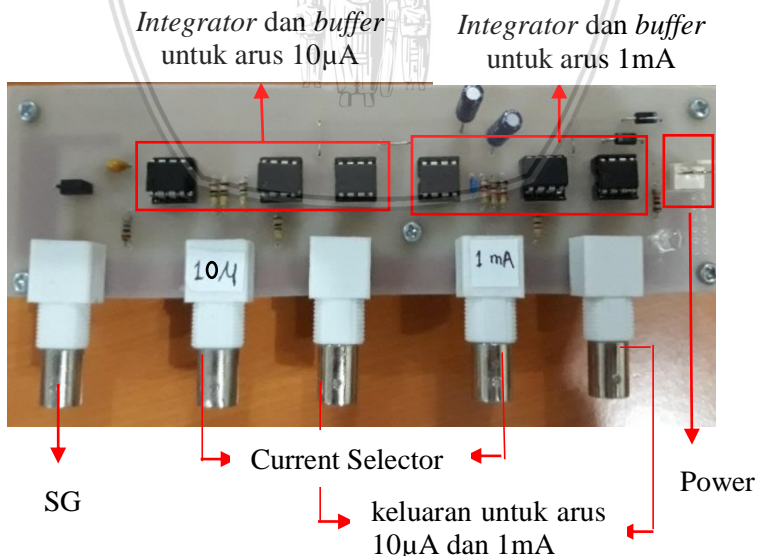
Pengujian keseluruhan sistem dilakukan dengan cara merangkai rangkaian secara keseluruhan yang terdiri dari *probe* plat sejajar, rangkaian sumber arus, *picoscope*, dan komputer atau PC. Selanjutnya rangkaian sumber arus diinjeksikan ke bahan melalui *probe* atau elektroda plat sejajar dan hasil keluaran akan di tampilkan ke *picoscope*. Masukan untuk rangkaian injeksi arus berasal dari sinyal generator yang berupa tegangan dan frekuensi. Setelah semua sistem telah dirangkai, *picoscope* akan merekam data pengukuran yang selanjutnya ditampilkan ke komputer.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

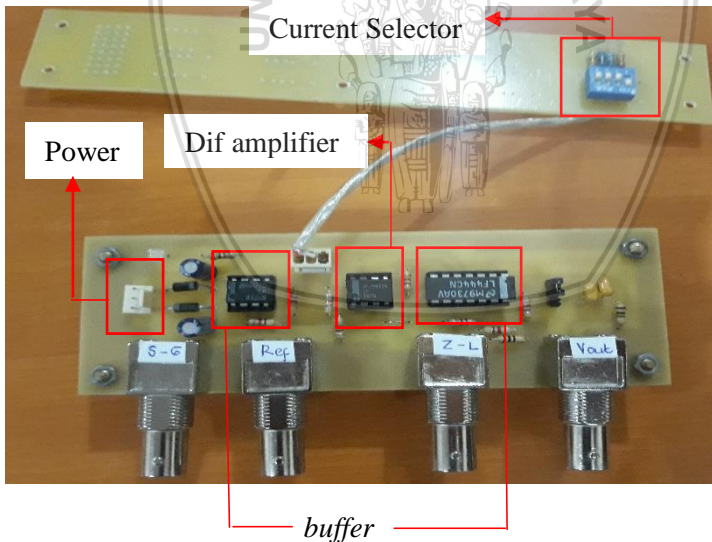
4.1 Hasil Desain Alat

Desain sistem instrumentasi yang telah dilakukan didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.1 yang merupakan rangkaian *Howland*. Pada modul sumber arus tipe *Howland* terdapat rangkaian *buffer* yang berfungsi memperbesar impedansi masukan supaya sinyal-sinyal kecil dapat terbaca. Selain *buffer* pada masukan, juga terdapat *buffer* pada alat ukur yang terhubung ke V out. Op-amp yang digunakan adalah op-amp yang memiliki karakter *high speed* dan *wide bandwidth*. Op-amp yang digunakan adalah IC op-amp LF351 dan LF353 yang memiliki rentang *bandwidth* sampai dengan 4MHz. Selanjutnya terdapat rangkaian penguat diferensial yang digunakan untuk menguatkan sinyal masukan. Kemudian terdapat *current selector* yang berfungsi untuk memilih arus yang akan diinjeksikan. Berdasarkan Gambar 4.1 nilai arus yang disediakan adalah 10 μ A dan 1mA. Selanjutnya juga terdapat *pin power* yang dihubungkan ke sumber tegangan dari catu daya 12V pada saat dilakukan pengukuran.



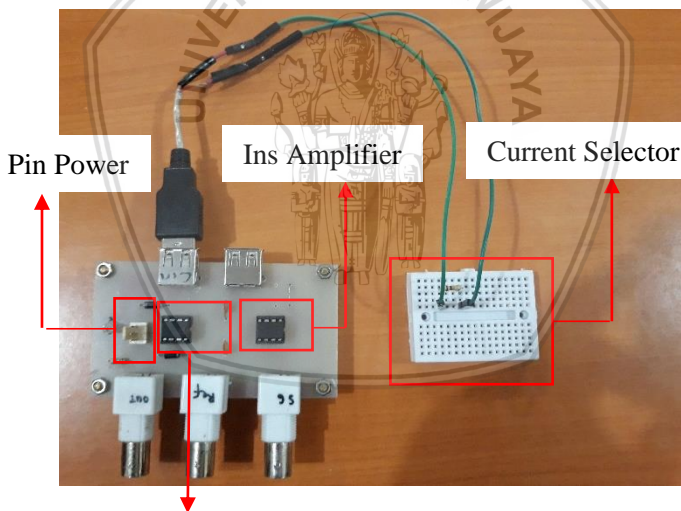
Gambar 4.1 Hasil desain Alat *Howland Current Source*.

Gambar 4.2 adalah hasil desain modul sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Pada Gambar 4.2 terdapat rangkaian *buffer* yang berfungsi untuk memperbesar impedansi masukan supaya sinyal-sinyal kecil dapat terbaca. Selain *buffer* pada masukan, pada modul sumber arus *Howland* termodifikasi juga terdapat *buffer* pada alat ukur yang terhubung ke V_{out} . Op-amp yang digunakan adalah op-amp yang memiliki karakter *high speed* dan *wide bandwidth*. Op-amp yang digunakan adalah IC op-amp LF351 yang memiliki rentang *bandwidth* sampai dengan 4MHz. Selanjutnya terdapat rangkaian penguat diferensial yang berfungsi untuk menguatkan sinyal masukan, *current selector* yang berfungsi untuk memilih arus yang akan di injeksikan. Pada modul sumber arus tipe *Howland* termodifikasi, *current selector* yang disediakan adalah arus yang nilainya dapat diubah-ubah yaitu $1\mu A$, $10\mu A$, $100\mu A$, dan $1mA$. Selanjutnya terdapat *pin power* yang dihubungkan ke sumber tegangan dari catu daya 12 Volt pada saat dilakukan pengukuran.



Gambar 4.2 Hasil Desain Alat Modifikasi *Howland Current Source*

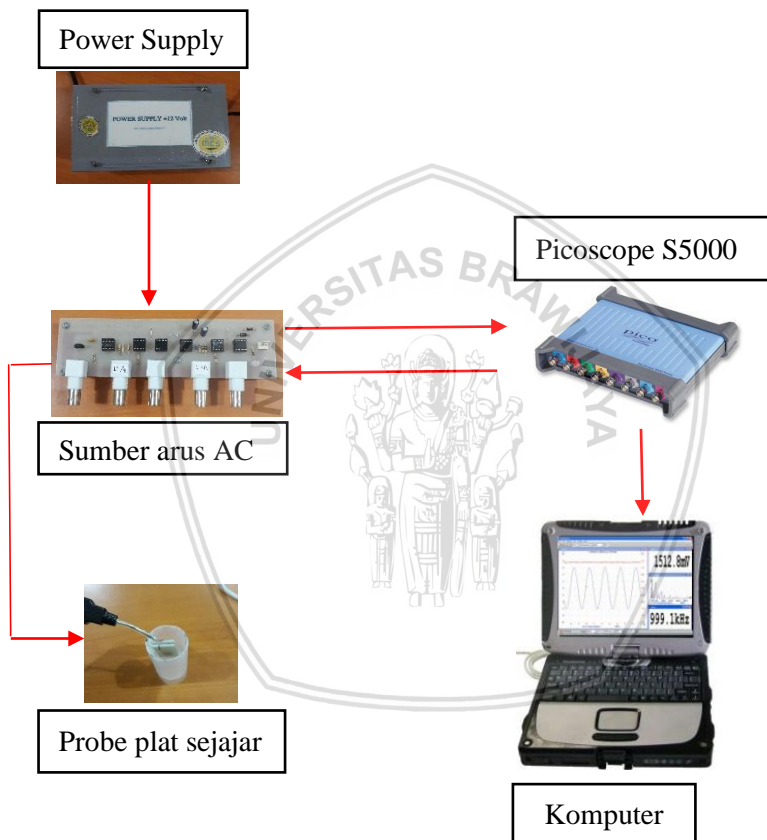
Pada Gambar 4.3 adalah hasil desain modul sumber arus tipe *Floating*. Berdasarkan Gambar 4.3 terdapat rangkaian *buffer* dan penguat diferensial yang berada menjadi satu pada IC op-amp LF353. Digunakan IC op-amp LF353 karena memiliki karakter *high speed* dan *wide bandwidth* yaitu dapat bekerja pada rentang frekuensi 4MHz. Rangkaian *buffer* yang berfungsi memperbesar impedansi masukan supaya sinyal-sinyal dapat terbaca. Penguat diferensial berfungsi untuk menguatkan sinyal masukan. Selanjutnya sinyal masukan akan dilewatkan ke penguat instrumentasi yang berfungsi untuk menguatkan tegangan keluaran sesuai dengan keperluan. Kemudian terdapat *current selector* yang berfungsi untuk memilih arus yang akan digunakan pada saat dilakukan pengukuran. Juga terdapat pin power yang dihubungkan ke sumber tegangan dari catu daya 12 Volt pada saat dilakukan pengukuran.



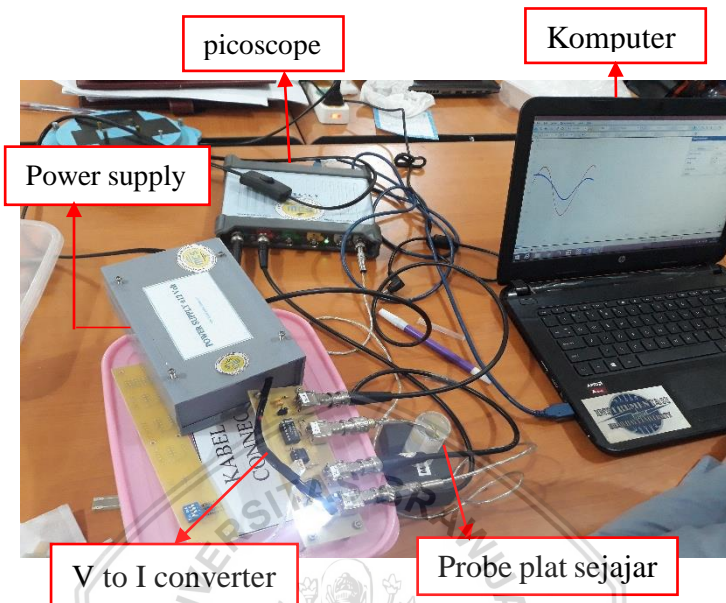
Buffer dan Penguat Diferensial

Gambar 4.3 Hasil Desain Alat *Floating Current Source*

Selanjutnya modul sumber arus akan dirangkai menjadi sebuah sistem pengukuran yang terdiri dari *power supply* sebagai sumber tegangan, *picoscope* sebagai alat ukur dan sistem akuisisi data, dan PC sebagai penampil gelombang keluaran dari *picoscope*. Konfigurasi rangkaian secara keseluruhan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Konfigurasi Penggunaan Alat

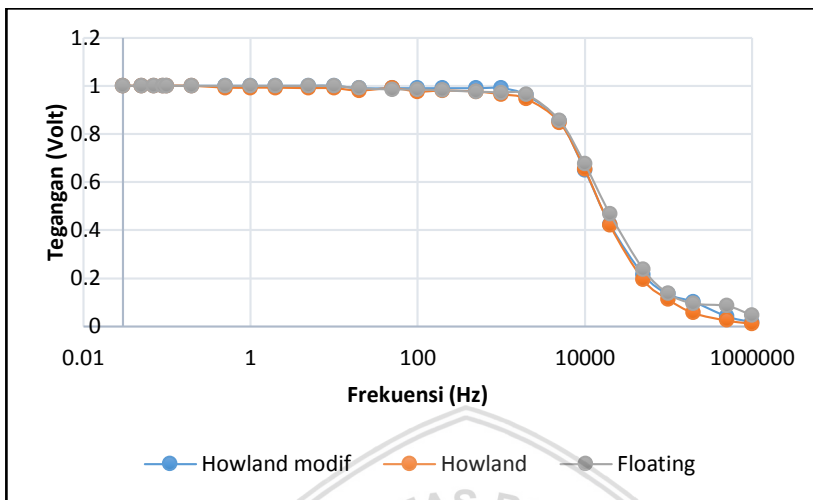


Gambar 4.5 Konfigurasi alat saat pengambilan data

Gambar 4.5 merupakan konfigurasi sistem secara keseluruhan pada saat pengambilan data. Sumber arus AC pada rangkaian *V to I Converter* diinjeksikan pada gelas ukur yang digunakan untuk menampung *probe* plat sejajar dan air sebagai bahan uji. Titik injeksi arus yang digunakan yaitu probe plat sejajar yang berbentuk lingkaran dengan ukuran 0.5 cm yang diletakkan secara *overlapping*.

4.2 Pengujian Alat

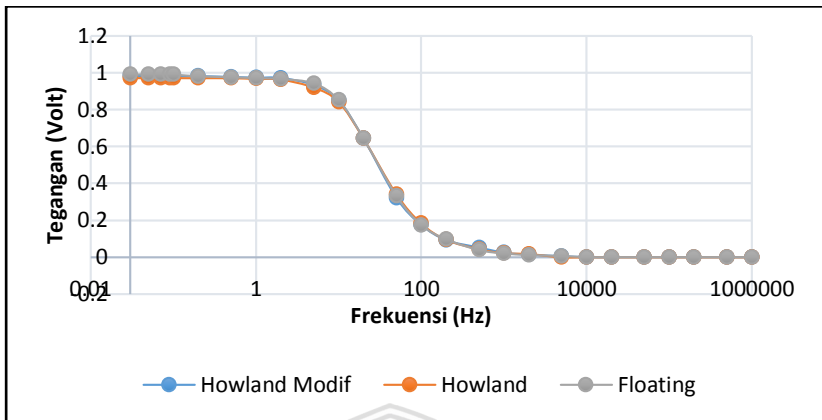
Sebelum dilakukan pengambilan data, terlebih dahulu dilakukan pengujian pada alat ukur. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah alat ukur dapat digunakan sesuai dengan yang diharapkan. Dengan dilakukannya pengujian ini diharapkan ketika dilakukan pengambilan data, alat dapat digunakan untuk meminimalisir *error* yang terjadi. Pengujian ini dilakukan pada sumber arus *Howland*, *Howland* termodifikasi, dan *Floating* dengan nilai R fix yaitu sebesar $100\text{k}\Omega$ dan juga dilakukan pengujian dengan R paralel C dengan nilai $R=100\text{k}\Omega$ dan $C=100\text{nF}$.



Gambar 4.6 Grafik pengujian dengan nilai $R=100k\Omega$

Gambar 4.6 merupakan grafik hasil pengujian arus listrik dengan R murni sebesar $100k\Omega$ untuk rangkaian sumber arus tipe *Howland*, *Howland* termodifikasi, dan *Floating Current Source*. Nilai tegangan yang digunakan sebesar 1V maka dengan adanya R murni tersebut nilai arus yang dihasilkan sebesar $10\mu A$. Kemudian untuk proses uji digunakan R_{Load} sebesar $100k\Omega$, sehingga tegangan keluaran dan tegangan masukan bernilai sama. Proses uji ini dilakukan mulai dari frekuensi 0.01Hz hingga 1MHz. Berdasarkan Gambar 4.6 dapat dilihat pada frekuensi 0.01Hz hingga 2KHz memiliki nilai tegangan *output* yang stabil dengan nilai 1V. Namun pada frekuensi 5KHz grafik menunjukkan adanya penurunan tegangan, ini disebabkan karena penggunaan arus $10\mu A$ yang hanya mampu hingga frekuensi 5KHz (-3dB). Untuk tegangan diatas 10KHz nilai tegangan akan terus menurun hingga menuju 0V.

Pengujian selanjutnya yaitu dengan nilai R sebesar $100k\Omega$ di paralel dengan C sebesar $100nF$. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik pengujian dengan $R=100k$ paralel $C=100nF$

Gambar 4.7 merupakan grafik hasil pengujian arus listrik dengan R murni sebesar $100k\Omega$ yang di paralel dengan nilai C murni sebesar $100nF$ untuk rangkaian *Howland*, *Howland* termodifikasi, dan *Floating*. Nilai tegangan yang digunakan sebesar $1V$, maka dengan adanya R murni dan C murni nilai arus yang dihasilkan sebesar $10\mu A$. Kemudian untuk proses uji digunakan R_{Load} sebesar $100k\Omega$ yang di paralel dengan C_{Load} sebesar $100nF$, sehingga tegangan masukan bernilai sama. Proses uji ini dimulai dari frekuensi $0.01Hz$ hingga $1MHz$. Berdasarkan gambar 4.7 dapat dilihat pada frekuensi $0.01Hz$ hingga $5Hz$ memiliki nilai tegangan output yang stabil dengan nilai $1V$. Namun pada frekuensi $10Hz$ grafik menunjukkan adanya penurunan tegangan yang dipengaruhi oleh nilai C murni, sehingga penggunaan arus $10\mu A$ hanya mampu hingga frekuensi $10Hz$ ($-3dB$). Untuk frekuensi diatas $10Hz$ nilai tegangan akan terus menurun hingga menuju $0V$.

Selain pengujian alat dengan picoscope, pengujian dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang didapatkan dari analisa rangkaian. Pengujian ini dilakukan untuk membuktikan apakah hasil pengujian alat yang telah dilakukan dengan picoscope memperoleh nilai yang sama dengan pengujian pada analisa rangkaian sumber arus *Floating*, *Howland*, *Howland* termodifikasi. Perhitungan nilai arus pada rangkaian sumber arus *Howland* dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.30 yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

$$I_L = \frac{V_{in}}{R} \quad (4.1)$$

$$I_L = \frac{1}{100.000}$$

$$I_L = 10 \mu A$$

Nilai tegangan masukan yang digunakan adalah 1V, kemudian untuk proses uji digunakan nilai R sebesar 100k Ω untuk arus sebesar 10 μ A.

Selanjutnya yaitu pengujian dengan analisa rangkaian dengan sumber arus *Howland* termodifikasi. Perhitungan untuk arus dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.36 yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

$$I_{out} = \frac{R_2}{R_1 R_x} V_{in} \quad (4.2)$$

$$I_{out} = \frac{4700}{4700 (100.000)} 1$$

$$I_{out} = 10 \mu A$$

Nilai tegangan masukan yang digunakan adalah 1V, kemudian untuk proses uji digunakan nilai R sebesar 100k Ω maka didapatkan arus sebesar 10 μ A.

Pengujian analisa rangkaian selanjutnya adalah pada rangkaian *Floating Current Source*. Perhitungan tegangan keluaran didapatkan pada persamaan 2.38 yang telah dibahas pada bab sebelumnya

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{R} \quad (4.3)$$

$$I_{out} = \frac{1}{100.000}$$

$$I_{out} = 10 \mu A$$

Nilai tegangan masukan yang digunakan adalah 1V, kemudian untuk proses uji digunakan R sebesar 100k Ω maka diperoleh arus sebesar 10 μ A.

Dengan pengujian analisa rangkaian pada rangkaian sumber arus *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi menunjukkan hasil yang sama dengan pengujian menggunakan picoscope. Sehingga berdasarkan perhitungan diatas, untuk tegangan keluaran 1V maka didapatkan konfigurasi nilai R murni yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian dengan perhitungan analisis rangkaian

Resistor	Arus
10 k Ω	100 μ A
100 k Ω	10 μ A
1 M Ω	1 μ A
10 M Ω	0.1 μ A

4.3 Pengujian Sistem Keseluruhan

Pengujian sistem secara keseluruhan yaitu dengan menguji rangkaian injeksi arus tipe *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi dalam melakukan pengambilan data. Pengujian dilakukan dengan menginjeksikan arus sebesar 10 μ A pada bahan uji air kran dengan rentang frekuensi 0.1Hz-1MHz yang diberikan oleh sinyal generator, yang selanjutnya dihubungkan ke rangkaian injeksi arus dan kemudian keluaran injeksi arus dihubungkan ke masukan *probe* plat sejajar dan nilai tegangannya akan diukur dengan picoscope.

Secara umum pengukuran injeksi arus yaitu dengan cara mengubah tegangan menjadi arus (V to I), sehingga keluaran dari rangkaian injeksi arus adalah arus. Arus yang telah diinjeksikan ke *probe* plat sejajar akan melewati suatu objek yang mempunyai hambatan, yaitu larutan air kran. Ketika dilakukan pengukuran dengan *probe* plat sejajar, maka akan diperoleh nilai tegangannya. Dengan diperoleh nilai tegangan dan arus yang diinjeksikan, maka selanjutnya nilai impedansi larutan dapat dihitung sesuai dengan rumus pada persamaan 4.1.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (4.1)$$

Pada pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter, yaitu pengujian dengan variasi panjang kabel, pengujian dengan elektroda jarum, dan pengujian dengan bahan uji madu menggunakan sensor IDT.

4.3.1 Pengujian Dengan Variasi Panjang Kabel

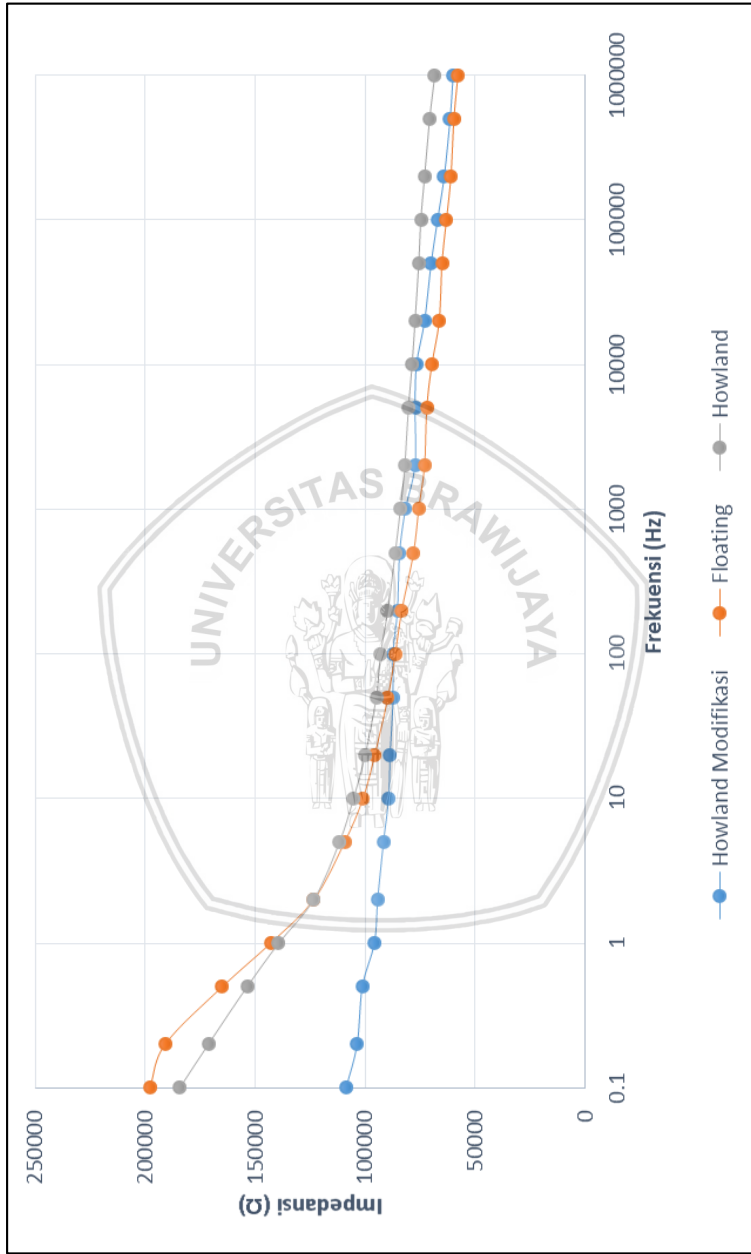
Pada pengujian dengan variasi panjang kabel ini dilakukan menggunakan probe plat sejajar dengan menginjeksikan arus sebesar $10\mu\text{A}$ pada bahan uji air kran dengan rentang frekuensi 0.1Hz-1MHz. Variasi panjang kabel yang digunakan adalah dengan panjang 5, 10, dan 15 cm yang dapat dilihat pada Gambar 4.8, 4.9, dan 4.10. Berdasarkan Gambar 4.8 menunjukkan grafik hubungan nilai impedansi dan frekuensi menggunakan panjang kabel 5cm. Garis warna biru menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Garis warna oranye menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan sumber arus tipe *Floating*. Garis warna abu-abu menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan sumber arus *Howland*. Pada frekuensi 0.1Hz-5Hz hasil pengukuran dengan rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan sumber arus tipe *Howland* didapatkan nilai impedansi yang lebih besar daripada dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi, dan nilai impedansi mulai stabil pada frekuensi 10Hz-1Mhz meskipun mengalami sedikit penurunan. Hal ini dikarenakan pada rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan *Howland* pada frekuensi 0.1-5Hz hasil pengukuran impedansi listrik masih dipengaruhi oleh reaktansi kapasitif dari alat ukur yaitu kabel atau elektroda yang digunakan sehingga menyebabkan nilai impedansi yang terukur lebih besar yaitu sebesar 198.000Ω - 109.000Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan 184.000Ω - 111.000Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Sedangkan pada rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi nilai reaktansi kapasitif dari alat ukur dapat tereduksi oleh model rangkaian, sehingga pengukuran nilai impedansi yang didapatkan lebih rendah yaitu sebesar 108.000Ω - 91.000Ω . Dari hasil pengukuran juga menunjukkan nilai impedansi yang terukur relatif stabil mulai dari frekuensi 20Hz-1MHz, hal ini dikarenakan pemilihan IC yang digunakan yaitu dapat bekerja pada rentang frekuensi hingga 4 Mhz sehingga pada frekuensi 1Mhz hasil pengukuran relatif stabil.

Pengujian selanjutnya yaitu menggunakan panjang kabel 10cm yang dapat dilihat pada Gambar 4.9. Berdasarkan Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan nilai impedansi dan frekuensi menggunakan panjang kabel 10cm. Garis warna biru menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Garis warna oranye menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating*. Garis warna abu-abu menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Pada frekuensi 0.1Hz-10Hz hasil pengukuran dengan rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan sumber arus tipe *Howland* didapatkan nilai impedansi yang lebih besar daripada dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi, dan nilai impedansi mulai stabil pada frekuensi 20Hz-1Mhz meskipun mengalami sedikit penurunan. Hal ini dikarenakan pada rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan *Howland* pada frekuensi 0.1-10Hz hasil pengukuran masih dipengaruhi oleh reaktansi kapasitif dari alat ukur yaitu kabel atau elektroda yang digunakan sehingga menyebabkan nilai impedansi yang terukur lebih besar yaitu sebesar 216.000Ω - 110.000Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan 204.000Ω - 113.000Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Sedangkan pada rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi nilai reaktansi kapasitif dari alat ukur dapat tereduksi oleh model rangkaian, sehingga nilai impedansi yang didapatkan lebih rendah yaitu sebesar 114.000Ω - 86.000Ω . Dari hasil pengukuran juga menunjukkan nilai impedansi yang terukur relatif stabil mulai dari frekuensi 100Hz-1MHz, hal ini dikarenakan pemilihan IC yang digunakan yaitu dapat bekerja pada rentang frekuensi hingga 4 Mhz sehingga pada frekuensi 1Mhz hasil pengukuran relatif stabil.

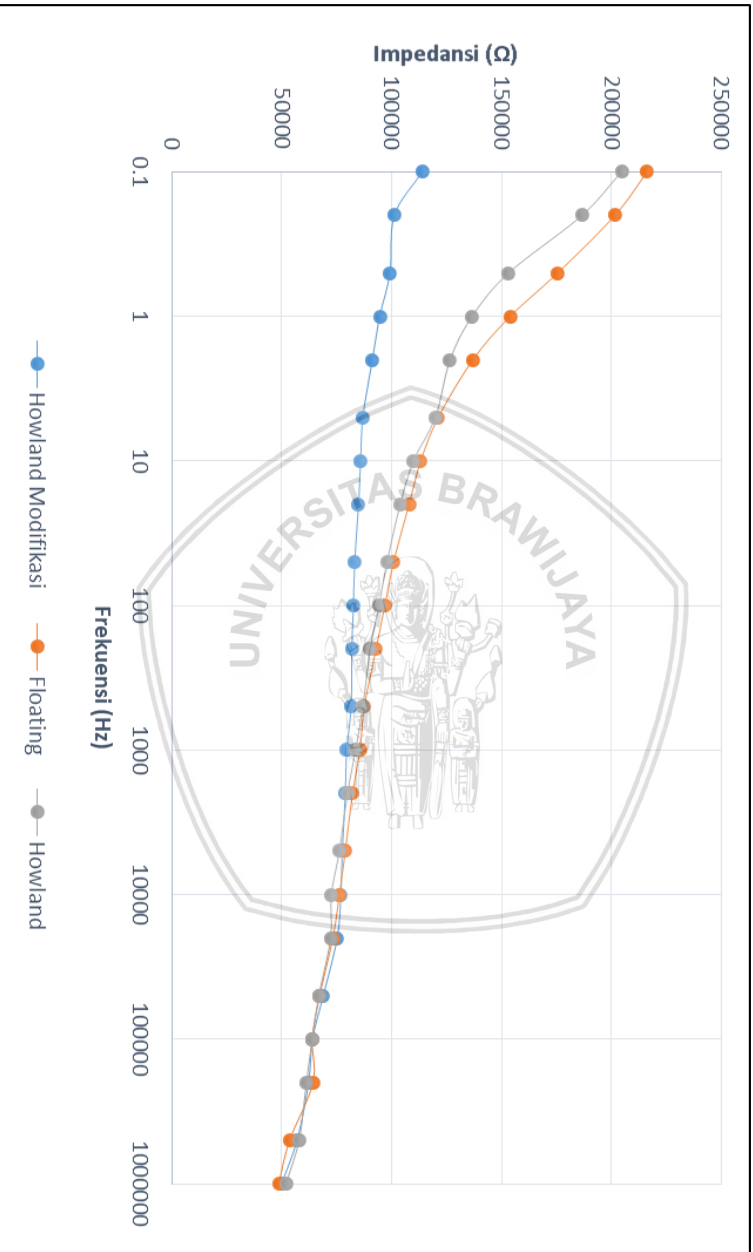
Pengujian selanjutnya yaitu dengan menggunakan panjang kabel 15cm yang dapat dilihat pada Gambar 4.10. Berdasarkan Gambar 4.10 menunjukkan grafik hubungan nilai impedansi dan frekuensi menggunakan panjang kabel 15cm. Garis warna biru menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Garis warna oranye menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating*. Garis warna abu-abu menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Pada frekuensi 0.1Hz-10Hz hasil pengukuran dengan rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan sumber arus tipe *Howland*

didapatkan nilai impedansi yang lebih besar daripada dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi, dan nilai impedansi mulai stabil pada frekuensi 20Hz-1Mhz meskipun mengalami sedikit penurunan. Hal ini dikarenakan pada rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan *Howland* pada frekuensi 0.1-10Hz hasil pengukuran masih dipengaruhi oleh reaktansi kapasitif dari alat ukur yaitu kabel atau elektroda yang digunakan sehingga menyebabkan nilai impedansi yang terukur lebih besar yaitu sebesar 183.000 Ω -97.300 Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan 199.000 Ω -100.000 Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Sedangkan pada rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi nilai reaktansi kapasitif dari alat ukur dapat tereduksi oleh model rangkaian, sehingga nilai impedansi yang didapatkan lebih rendah yaitu sebesar 116.000 Ω -76.600 Ω . Dari hasil pengukuran juga menunjukkan nilai impedansi yang terukur relatif stabil mulai dari frekuensi 20Hz-1MHz, hal ini dikarenakan pemilihan IC yang digunakan yaitu dapat bekerja pada rentang frekuensi hingga 4 Mhz sehingga pada frekuensi 1Mhz hasil pengukuran relatif stabil.

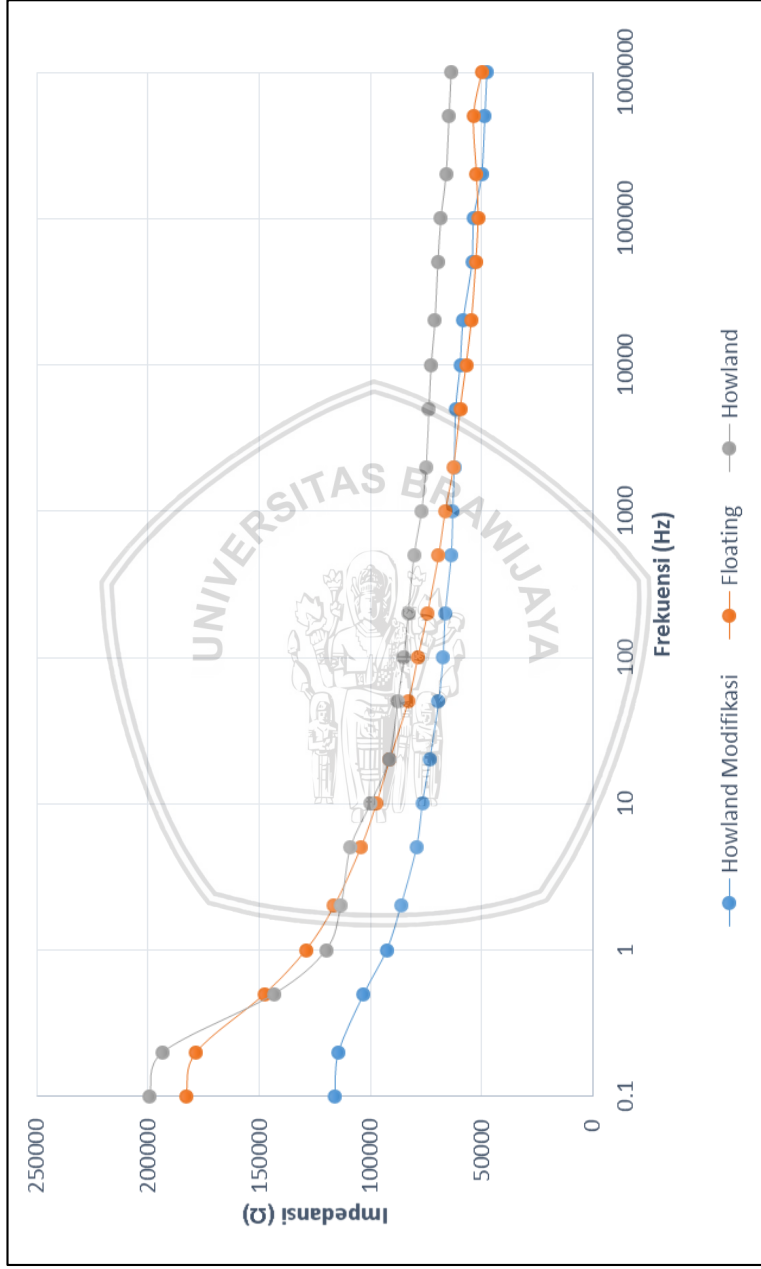
Berdasarkan pengujian pada Gambar grafik 4.8, 4.9, dan 4.10 menggunakan variasi panjang kabel 5cm, 10cm, dan 15cm menunjukkan pengukuran impedansi listrik dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan *Howland* hasil impedansi yang terukur lebih besar daripada dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Hal ini dikarenakan pada rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan *Howland* pengaruh reaktansi kapasitif dari alat ukur yang digunakan cukup besar, sehingga indikasi nilai impedansi yang terukur terpengaruh oleh reaktansi kapasitif dari kabel atau elektroda yang digunakan. Sedangkan pengukuran dengan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi dengan menggunakan variasi panjang kabel 5cm, 10cm, dan 15cm nilai impedansi yang terukur lebih rendah dan cenderung stabil, hal ini dikarenakan pengaruh reaktansi kapasitif dari alat ukur dapat direduksi oleh model rangkaian dengan baik. Sedangkan pada frekuensi 20Hz-1MHz nilai impedansi yang terukur relatif stabil dan tidak mengalami penurunan yang drastis, hal ini dikarenakan pemilihan dari IC yang digunakan yaitu memiliki kelebihan pada respon frekuensi yang tinggi yaitu mencapai 4MHz, sehingga pada pengukuran yang telah dilakukan nilai impedansi akan tetap stabil hingga frekuensi 1MHz.



Gambar 4.8 Grafik nilai impedansi listrik larutan air kran dengan panjang kabel 5 cm.



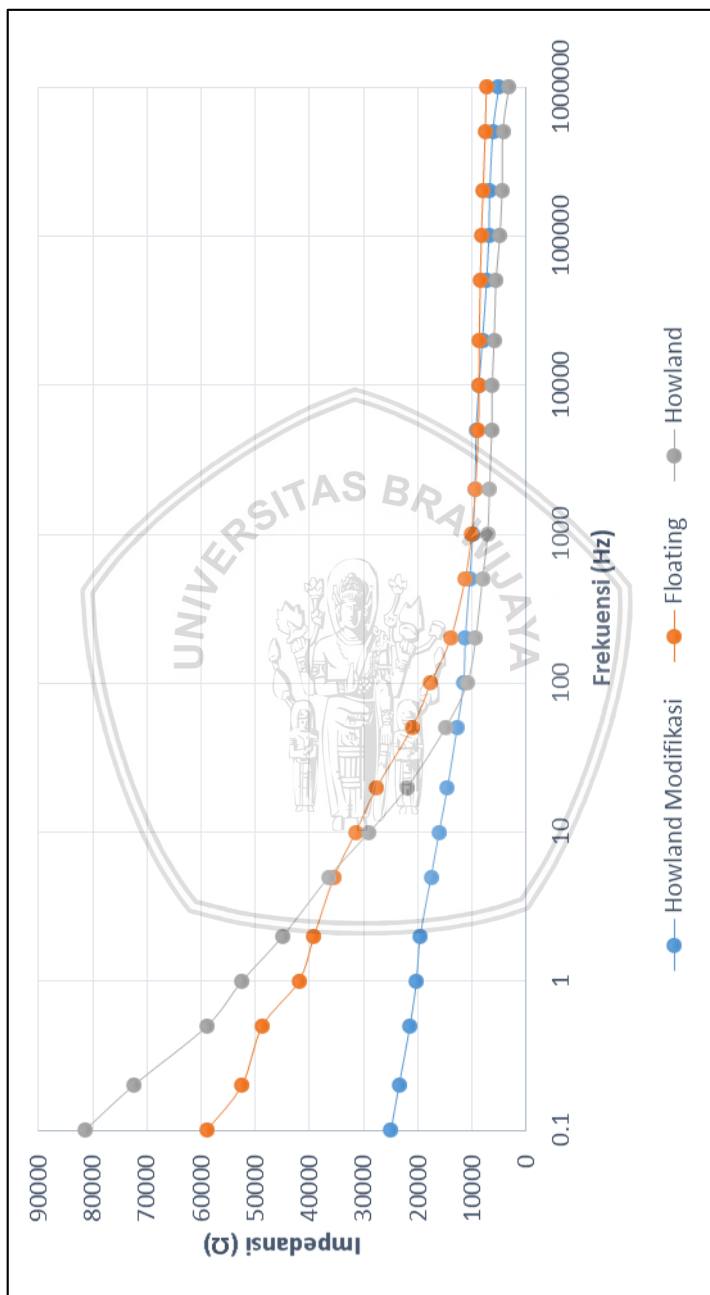
Gambar 4.9 Grafik nilai impedansi listrik larutan air kran dengan panjang kabel 10 cm.



Gambar 4.10 Grafik nilai impedansi listrik larutan air kran dengan panjang kabel 15 cm.

4.3.2 Pengujian Dengan Elektroda jarum

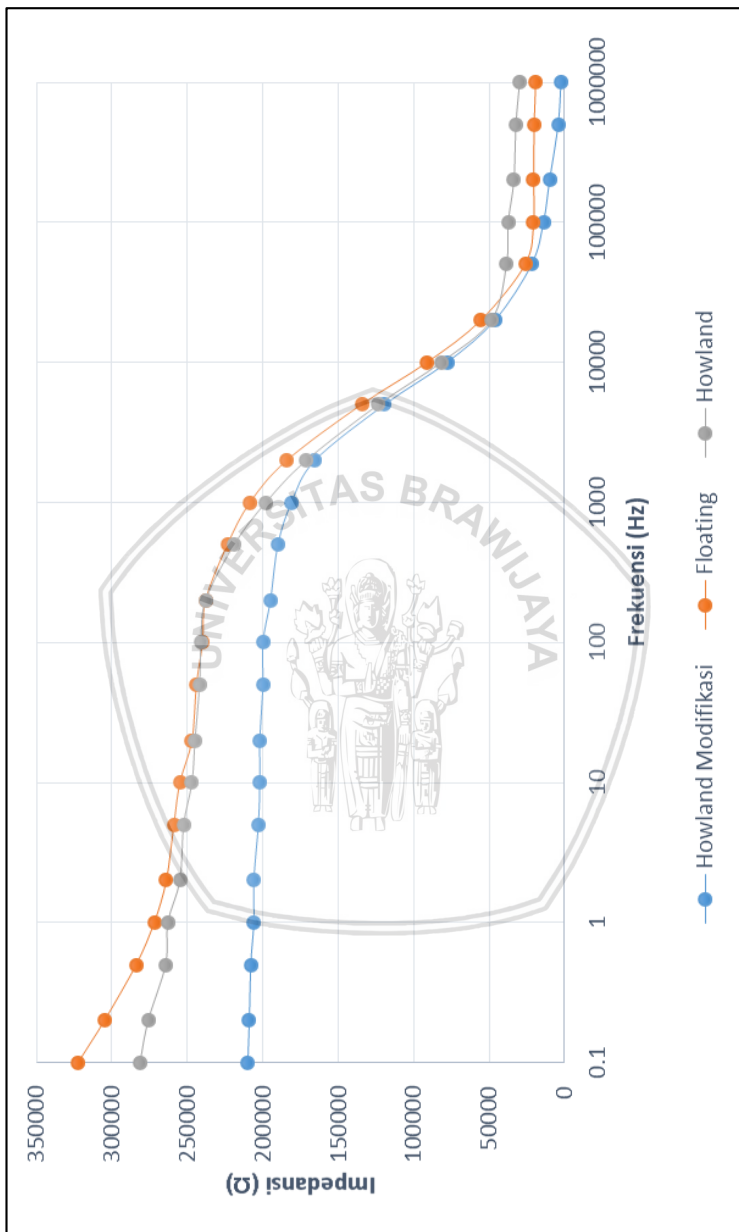
Pengujian selanjutnya yaitu menggunakan elektroda jarum untuk mengetahui apakah hasil pengukuran yang diperoleh menunjukkan *trendline* yang sama untuk masing-masing sumber arus. Pengukuran dengan menginjeksikan arus sebesar $10\mu\text{A}$ pada bahan uji air dengan rentang frekuensi 0.1Hz - 1MHz . Gambar 4.11 menunjukkan grafik hubungan nilai impedansi listrik dengan frekuensi menggunakan elektroda jarum. Garis warna biru menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Garis warna oranye menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating*. Garis warna abu-abu menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Hasil pengukuran untuk frekuensi 0.1Hz - 100Hz dengan rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan sumber arus *Howland* diperoleh nilai impedansi yang lebih besar daripada dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Nilai impedansi mulai stabil pada frekuensi 200Hz - 1Mhz meskipun mengalami sedikit penurunan. Hal ini dikarenakan pada rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan *Howland* pada frekuensi 0.1 - 100Hz hasil pengukuran masih dipengaruhi oleh reaktansi kapasitif dari alat ukur yaitu kabel atau elektroda yang digunakan sehingga menyebabkan nilai impedansi yang terukur lebih besar yaitu sebesar 66.500Ω - 17.650Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Floating* dan 89.500Ω - 10.900Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Sedangkan pada rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi nilai reaktansi kapasitif dari alat ukur dapat tereduksi oleh model rangkaian, sehingga nilai impedansi yang didapatkan lebih rendah yaitu sebesar 27.200Ω - 11.600Ω . Selanjutnya pada frekuensi 200Hz - 1Mhz nilai impedansi yang terukur relatif stabil dan tidak mengalami penurunan secara drastis, hal ini dikarenakan pada pemilihan IC yang digunakan memiliki respon frekuensi yang tinggi yaitu mencapai 4Mhz , sehingga ketika frekuensi mendekati 1Mhz nilai impedansi yang terukur masih stabil. Berdasarkan pengukuran dengan menggunakan elektroda jarum diperoleh hasil pengukuran dengan *trendline* yang sama seperti pada pengukuran menggunakan variasi panjang kabel dengan elektroda plat sejajar. Dengan demikian pengukuran dengan menggunakan elektroda jarum, sumber arus tipe *Howland* termodifikasi mampu mereduksi reaktansi kapasitif dari elektroda atau kabel yang digunakan.



Gambar 4.11 Grafik nilai impedansi listrik menggunakan elektroda jarum.

4.3.3 Pengujian dengan Bahan Uji Madu

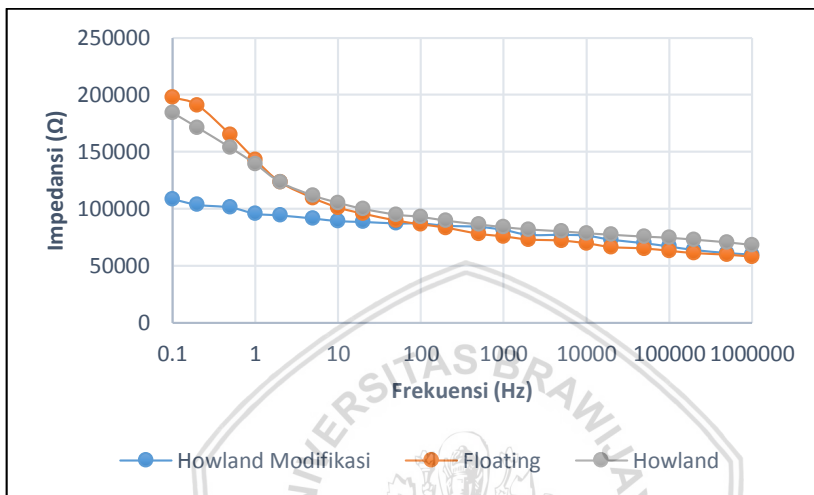
Pengujian selanjutnya dilakukan menggunakan probe IDT (interdigital Transducer) dengan bahan uji yang digunakan yaitu madu. Pengujian dilakukan dengan menginjeksikan arus sebesar $10\mu\text{A}$ pada bahan uji madu pada rentang frekuensi 0.1Hz-1MHz. Hasil pengujian impedansi listrik pada bahan uji madu dengan probe IDT dapat dilihat pada Gambar 4.12. Berdasarkan Gambar 4.12 menunjukkan grafik hubungan antara nilai impedansi listrik dengan frekuensi pada bahan uji madu menggunakan sensor IDT. Warna biru menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Warna oranye menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating*. Warna abu-abu menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Pada frekuensi 0.1Hz-1Hz hasil pengukuran dengan rangkaian sumber arus *Floating* dan sumber arus *Howland* didapatkan nilai impedansi yang lebih besar yaitu sebesar 328.000Ω - 272.000Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Floating*, 289.000Ω - 263.000Ω untuk rangkaian sumber arus tipe *Howland*, dan nilai impedansi mulai stabil pada frekuensi 2Hz-1KHz, hal ini dikarenakan pada frekuensi 0.1Hz-1Hz pengukuran masih terpengaruh oleh reaktansi kapasitif dari alat ukur. Sehingga indikasi nilai impedansi yang terukur terpengaruh dari kabel atau sensor IDT yang digunakan. Sedangkan hasil pengukuran dengan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi didapatkan hasil impedansi listrik sebesar 211.000Ω dan hasil menunjukkan kestabilan pada frekuensi 0.1Hz-1KHz sehingga pada pengukuran ini reaktansi kapasitif dari alat ukur dapat tereduksi dengan baik. Selanjutnya pada frekuensi diatas 1KHz nilai impedansi mengalami penurunan, hal ini dikarenakan pada frekuensi diatas 1KHz nilai impedansi yang terukur dipengaruhi oleh resistansi. Hasil pengujian pada bahan uji madu menggunakan probe IDT juga menunjukkan *trendline* yang sama dengan pengujian sebelumnya. Dengan demikian pengukuran impedansi listrik menggunakan sumber arus tipe *Howland* termodifikasi dapat mereduksi reaktansi kapasitif dari elektroda yang digunakan pada probe IDT.



Gambar 4.12 Grafik nilai impedansi listrik pada bahan uji madu menggunakan IDT.

4.5 Hubungan Impedansi dengan Frekuensi

Untuk melihat hubungan hasil pengukuran impedansi larutan dengan frekuensi, dapat dilihat pada gambar 4.13.

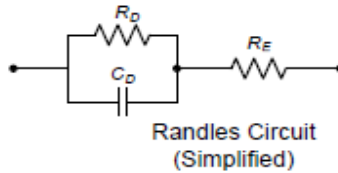


Gambar 4.13 Grafik hubungan antara frekuensi dan impedansi listrik pada air dengan panjang kabel 5 cm.

Berdasarkan Gambar 4.13 adalah grafik hubungan antara frekuensi dan impedansi listrik pada air kran dengan panjang kabel 5 cm. Warna biru menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi. Warna oranye menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating*. Warna abu-abu menunjukkan pengukuran impedansi listrik menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland*. Nilai impedansi yang terukur akan semakin rendah dengan semakin tinggi nya frekuensi. Pada frekuensi 0.1Hz-20Hz nilai impedansi yang didapatkan cenderung lebih tinggi daripada frekuensi diatas 20 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa pada frekuensi dibawah 20 Hz pengaruh kapasitor cukup signifikan.

Secara umum pengukuran impedansi listrik dimodelkan secara sederhana sebagai rangkaian Randels (Randels Circuit). Rangkaian Randels dapat dilihat pada Gambar 4.14. Berdasarkan Gambar 4.14 R_D dan C_D mewakili resistansi dan kapasitansi *double layer*, sedangkan R_E mewakili resistansi larutan. Dalam model yang lebih kompleks larutan dimodelkan kombinasi dari resistansi dan

kapasitansi secara seri maupun paralel. Namun, pada penelitian ini cukup menggunakan rangkaian yang sederhana tersebut, karena sudah dapat digunakan untuk mewakili pengukuran dengan baik.



Gambar 4.14 Rangkaian Listrik ekuivalen model Randels.

Besarnya impedansi listrik total (Z_T) adalah jumlah impedansi paralel (Z_D), impedansi *double layer* dengan impedansi larutan (R_E), yang dinyatakan oleh persamaan 4.3.

$$Z_T = Z_D + Z_E \quad (4.3)$$

Dimana Z_D adalah nilai paralel dari R_D dengan X_{CD} , dimana :

$$X_{CD} = \frac{1}{j\omega C_D}, \quad \omega = 2\pi f \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_D} + \frac{1}{X_{CD}} = \frac{1}{R_D} + j\omega C_D \quad (4.5)$$

$$Z_D = \frac{R_D}{(1 + j\omega R_D C_D)} \quad (4.6)$$

Sehingga,

$$Z_T = R_E + \frac{R_D}{(1 + j\omega R_D C_D)} \quad (4.7)$$

Selanjutnya rumus pada persamaan (4.7), nilai Z_T dapat ditentukan dalam 2 kondisi sebagai berikut

1. $\omega \approx 0$ (sangat kecil), diperoleh :

$$Z_T = R_E + \frac{R_D}{(1 + j\omega R_D C_D)} = R_E + \frac{R_D}{(1 + j0)} \quad (4.8)$$

$$|Z| = R_E + R_D \quad (4.9)$$

2. Untuk $\omega \approx \infty$ (sangat besar), diperoleh :

$$Z_T = R_E + \frac{R_D}{(1+j\omega R_D C_D)} = R_E + \frac{R_D}{(1+j\infty)} \quad (4.10)$$

$$|Z| = R_E \quad (4.11)$$

Nilai ω memiliki unsur frekuensi di dalamnya maka pada kondisi $\omega \approx 0$ (sangat kecil), semakin kecil nilai ω -nya maka nilai impedansinya semakin besar. Sedangkan pada kondisi $\omega \approx \infty$ (sangat besar), semakin besar nilai ω -nya maka nilai impedansinya kecil (Ando, 2014). Hasil pengukuran didapatkan keselarasan antara frekuensi dengan nilai impedansi. Semakin tinggi nilai frekuensinya, maka nilai impedansi semakin kecil atau rendah.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini telah diketahui hasil pengukuran impedansi listrik dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi. Hasil eksperimen yang telah dilakukan menyatakan bahwa hasil pengukuran impedansi listrik dengan menggunakan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi lebih stabil daripada hasil pengukuran impedansi dengan sumber arus tipe *Floating* dan *Howland*. Diperoleh hasil pengukuran impedansi listrik dengan rangkaian sumber arus tipe *Howland* termodifikasi mampu mereduksi reaktansi kapasitif dari kabel atau elektroda yang digunakan. Sedangkan hasil pengukuran impedansi listrik dengan menggunakan rangkaian sumber arus *Howland* dan *Floating* masih dipengaruhi reaktansi kapasitif dari kabel atau elektroda yang digunakan.

5.2 Saran

Pengembangan metode injeksi arus tipe *Floating*, *Howland*, dan *Howland* termodifikasi pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan menggunakan bahan uji lainnya dan alat ukur impedansi dari ketiga sumber arus dapat dibandingkan dengan alat ukur yang terstandarisasi agar diperoleh perbandingan nilai impedansi dari keduanya.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Ando, Y., (2014). *Electrical Impedance Analysis of Potato Tissue Durying Drying*. Japan: Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsakuba.
- Analog Device. (1999). *Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier AD620*. pp. 1–16. Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>.
- Batra, P. and Kapoor, R. (2012). *A Comparative Study Of Current Sources Used In Bioimpedance Measurement Systems*. International Journal of Electronics Signals and Systems, 1(3), pp. 87–90.
- Bertemes-Filho, P. *et al.* (2012) .*Low power current sources for bioimpedance measurements: A comparison between Howland and integrated CMOS OTA circuits*. Journal of Electrical Bioimpedance, 3(1), pp. 66–73. doi: 10.5617/jeb.380.
- Bertemes-Filho, P., Felipe, A. and Vincence, V. C. (2013). *High Accurate Howland Current Source: Output Constraints Analysis*. Circuits and Systems, 4(7), pp. 451–458. doi: 10.4236/cs.2013.47059.
- Bouchaala, D. (2016). *Investigation of Current Excitation for Personal Health and Biological Tissues Monitoring*. p. 167. Availableat:http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/20480/Dissertation_Print_Bouchaala.pdf.
- Chowdhury, A.et al., (2015). *Studying The Electrical Impedance Variations In Banana Ripening Using Electrical Impedance Spectroscopy (EIS)*., pp.1-4
- Instruments, T. (1995). *LF444 Quad Low Power JFET Input Operational Amplifier*.
- Giancoli, Douglas C. (2001). *Fisika Jilid 2 Edisi Kelima*. diterjemahkan Dra. Yuhliza Hanum, M. Eng. Jakarta: Erlangga.

repository.ub.ac.id

Instruments, T. and National Semiconductor (1998). *Datasheet: LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier*. (April), pp. 1–14. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lf351-n.pdf>.

Islam, S. M. M., Reza, M. A. R. and Kiber, M. A. (2013). *Performances Of Multi-Frequency Voltage To Current Converters For Bioimpedance Spectroscopy*. Bangladesh Journal of Medical Physics, 5(1), pp. 71–76.

Liu, X. (2006). *Electrical Impedance Spectroscopy Applied In Plant Physiology Studies*, School of Electrical and Computer Engineering, RMIT University, pp. 51–66.

National Semiconductor (2001). *JFET Input Operational Amplifiers*. pp. 1–24.

Nuryanto, Lilik Eko. (2017). *Penerapan dari Op-Amp (Operational amplifier)*. Orbith vol.13, no.1, hal 44-50.

Palendeng, I. H., Wuwung, J.O., Allo, E. K. & Narasiang, B.S., (2012). *Rancang Bangun Sistem Audio Nirkabel*. E-Journal Teknik Elektro dan Komputer vol. I, no. 4, pp., 1-5.

Prakasa, R.N. (2017). *Pengukuran Distribusi Impedansi Listrik Pada Cairan Menggunakan Multiprobe Dengan Teknik Switching*, Malang : Universitas Brawijaya.

Texas Instrument (1998). *LF353-N LF353-N Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier Check for Samples: LF353-N IFEATURES DESCRIPTION*. p. 17. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lf353-n.pdf>.